



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VLIV PROVOZNÍCH PARAMETRŮ KOTLE NA
PŘÍTOMNOST JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH**

EFFECT OF OPERATING PARAMETERS OF THE BOILER ON PRESENCE OF FINE
PARTICLES IN FLUE GAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Košťál

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jan Košťál**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv provozních parametrů kotle na přítomnost jemných částic ve spalínách

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce bude seznámení s problematikou produkce jemných částic ve spalínách a technikami jejich měření a sledování. V rámci zpracování práce budou realizovány experimentální měření koncentrace a velikosti jemných částic ve spalínách biomassového kotle. Vyhodnocen bude vliv provozních parametrů kotle na tvorbu jemných částic.

Cíle diplomové práce:

1. Popsat proces spalování se zaměřením na plynné produkty a v nich rozptýlené jemné částice.
2. Představit způsob měření jemných částic ve spalínách.
3. Návrh měřicího stendu pro identifikaci koncentrace částic ve spalínovodu experimentálního kotle.
4. Realizovat experimentální měření koncentrace jemných částic.
5. Vyhodnocení vlivu provozních parametrů kotle na tvorbu částic.

Seznam literatury:

LACKNER, Maximilian, Franz WINTER a Avinash K. (Avinash Kumar) AGARWAL. Handbook of combustion. 2010. Weinheim: Wiley-VCH,, 5 sv. ISBN 978-3-527-32449-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

.....
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje problematice vzniku jemných částic v závislosti na parametrech spalování. Úvodní část práce tvoří přehled, který shrnuje informace o procesu spalování a o vzniku plynných produktů a v nich obsažených jemných částic, které během procesu spalování vznikají. Hlavní náplní práce je realizace měření jemných částic, vznikajících spalováním v několika testovaných spalovacích zařízeních. Dále byl proveden popis měřicích přístrojů, pomocí nichž bylo měření provedeno. Poslední kapitoly jsou zaměřeny na vyhodnocení výsledků měření, jejich srovnání a zjištění existence závislosti vzniku jemných částic na provozních parametrech kotle. A všechny výsledky jsou zhodnoceny v závěru.

ABSTRACT

This diploma thesis is devoted to the issues of the formation of fine particles in dependents on the combustion parameters. The first part of thesis is review, which summarized the information about combustion process and about formation of the gaseous products and fine particles inside them which created during combustion process. The main content of thesis is realization of measurements of fine particles from combustion, in several types of the tested combustion devices. Next part is a description of used measurement devices, which used for measurement. Last chapters are focused on evaluation of results from the measurements, comparison of the measurements between themselves and the finding the existence of the dependence of the formation of fine particles on operational parameters of boiler. And all results are evaluated in the conclusion.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spalování, emise, jemné částice, koncentrace jemných částic, kotel, parametry měření

KEY WORDS

Combustion, emission, fine particles, fine particles concentration, boiler, measurement parametres

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠŤÁL, J. *Vliv provozních parametrů kotle na přítomnost jemných částic ve spalínách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*VLIV PROVOZNÍCH PARAMETRŮ KOTLE NA PŘÍTOMNOST JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jan Košťál

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za vedení a za cenné rady a připomínky při vypracování mé diplomové práce.

Obsah

1	ÚVOD	13
2	SPALOVÁNÍ	14
2.1	Palivo a jeho vlastnosti	14
2.1.1	Plynná paliva	15
2.1.2	Kapalná paliva	15
2.1.3	Pevná paliva	15
2.1.4	Složení pevných paliv	16
2.2	Statika spalování	16
2.2.1	Výpočet množství spalovacího vzduchu pro pevná a kapalná paliva	17
2.2.2	Výpočet objemu vzduchu	17
2.2.3	Spalování s přebytkem vzduchu	18
2.2.4	Složení spalín	19
2.2.5	Výpočet objemu spalín	19
3	ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK	21
3.1	Plynné znečišťující látky	21
3.1.1	CO ₂ – oxid uhličitý	21
3.1.2	CO – oxid uhelnatý	22
3.1.3	SO ₂ , SO ₃ – oxid siřičitý, oxid sírový	22
3.1.4	Oxidy dusíku NO _x	23
3.1.5	O ₃ – ozón	23
3.1.6	Dioxiny a Furany	24
3.1.7	Polycyklické aromatické uhlovodíky – PAH (PAU)	25
3.2	Tuhé znečišťující látky (TZL)	26
3.2.1	Tvorba TZL při spalování	26
3.2.2	Popílek	27
3.2.3	Saze	27
3.2.4	Organické částice	28
4	ÚČINKY ULTRAJEMNÝCH ČÁSTIC NA LIDSKÝ ORGANISMUS	30
4.1	Částice PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁ , PM _{0,1}	30
4.2	Škodlivost částic	31
5	MĚŘENÍ EMISÍ	32
5.1	Základní pojmy	32
5.2	Zdroje emisí	32
5.3	Sledované emise	32
5.3.1	Kriteriální polutanty	32
5.4	Emise kotlů na tuhá paliva malých výkonů	33
5.5	Emisní limity a normy	34

5.5.1	Emisní třídy kotlů	34
5.6	Způsoby měření emisí TZL	36
5.7	Druhy analyzátorů plyných škodlivin	37
5.7.1	Ruční přenosné analyzátory spalín	37
5.7.2	Stacionární analyzátory spalín	37
5.8	Metody a přístroje pro analýzu TZL ve spalínách	38
5.8.1	Gravimetrická metoda.....	38
5.8.2	Přenosná aparatura Wohler SM 96.....	38
5.8.3	Měřicí systém SMPS	39
5.8.4	Ostatní metody měření TZL	39
6	NÁVRH MĚŘICÍHO STENDU PRO MĚŘENÍ JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH.....	40
6.1	Automatický kotel na biomasu VERNER A251	40
6.2	Automatický kotel Ekoscroll V7 Economic	42
6.3	Ředicí zařízení – Rotating Disc Thermodiluter 379020A.....	44
6.4	Třídící zařízení – Electrostatic Classifier 3080	46
6.5	Sčítací zařízení – Condensation Particle Counter (CPC) 3775	48
6.6	Vyhodnocovací program – Aerosol Instrument Manager Software.....	50
7	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	52
7.1	Seznámení s přístroji a prvotní měření	52
7.2	Volba ředicího poměru.....	53
7.3	Kotel VERNER A251 - palivo kávové pelety	54
7.3.1	Měření 1 – Kávové pelety	55
7.3.2	Měření 2 – Kávové pelety	60
7.3.3	Měření 3 – Kávové pelety	64
7.3.4	Měření 4 – Kávové pelety	68
7.4	Kotel VERNER A251 – palivo dřevní pelety	72
7.4.1	Měření 5 – Dřevní pelety	72
7.5	Kotel Ekoscroll V7 Economic – dřevní pelety	77
7.5.1	Měření 6 – Dřevní pelety Ekoscroll	77
8	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	82
8.1	Čtyři různá množství spalovacího vzduchu při spalování kávy.....	82
8.2	Porovnání spalování kávových a dřevních pelet na stejném kotli.....	84
8.3	Porovnání spalování dřevních pelet na dvou kotlích	85
8.4	Vývoj koncentrace plyných škodlivin	87
9	ZÁVĚR	88
10	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	90
11	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	93

1 ÚVOD

Při procesu spalování, a zejména při spalování pevných paliv, vzniká velké množství škodlivých látek, ať už se jedná o plynné škodliviny, různé organické sloučeniny nebo tuhé znečišťující látky. Tyto látky mohou mít negativní dopad jak na lidský organismus, tak na životní prostředí. Produkce těchto škodlivin je omezována různými emisními limity a tyto limity se nadále zpřísňují. Proto se v poslední době začíná stále více dbát na to, aby tyto látky vůbec nevznikaly nebo aby vznikaly v co nejmenším množství. Toho lze docílit několika možnými způsoby.

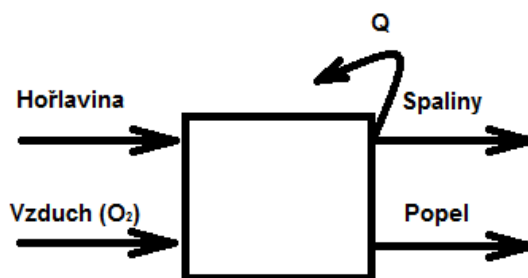
První variantou je používání co nejkvalitnějších paliv, tato varianta je nejlevnější, protože si stačí prostudovat složení paliva, které by mělo být dostupné u dodavatele, a poté si vybrat nejkvalitnější palivo za nejvýhodnější cenu. Další variantou je pořízení ekologičtějšího spalovacího zařízení. Co se týče této varianty, dle zákona budou majitelé starších spalovacích zařízení povinni pořídit si novější a více ekologické, náklady pak závisí pouze na typu spalovacího zařízení. Další možnou variantou, jak ještě více snížit emise, je použití filtrů a odlučovačů, které se připojí ke stávajícímu spalovacímu zařízení. Tato varianta se však používá především u větších zdrojů znečištění (elektrárny, teplárny).

Aby bylo možné předepsané emisní limity dodržovat, je nutné, aby bylo tyto emise čím měřit. Měření znečišťujících látek se pořád vyvíjí a jsou zkoušeny nové a lepší metody, které zachytí stále menší koncentrace znečišťujících látek.

2 SPALOVÁNÍ

Spalování je proces, při kterém dochází k rychlému oksyličování (oxidaci) paliva až na jeho konečné produkty. Při spalování dochází k uvolnění chemické energie vázané v palivu a dochází k její přeměně na energii tepelnou, kterou lze dále využívat například pro ohřev vody nebo pro přeměnu na další druh energie (mechanickou, elektrickou). Podle toho, jaký prvek se účastní chemické reakce, rozlišujeme reakce exotermické (hoření uhlíku $C+O_2 \rightarrow CO_2$), při kterých dochází k vývinu tepla a reakce endotermické (rozklad H_2O), které teplo spotřebovávají a slouží tak k regulaci spalovacího procesu.

Vstupními produkty do procesu spalování jsou palivo a vzduch, výstupem jsou poté tepelná energie, spaliny a popel.



Obr. 2.1: Spalovací proces schéma [1]

2.1 Palivo a jeho vlastnosti

Nejdůležitější součástí paliva je hořlavina s dostatečnou výhřevností, která se podílí na samotném procesu hoření, složení hořlaviny pak závisí na typu paliva. Další součástí je popelovina, je tvořena minerálními látkami v palivu a nepodílí se na procesu hoření. Popelovina v nezanedbatelném množství je součástí pouze u tuhých paliv a její obsah v palivu je nežádoucí. Poslední složkou paliva je voda, která je stejně jako popelovina nežádoucí, ale na rozdíl od popeloviny se může objevit u všech typů paliv. Sušením paliva může však být částečně odstraněna. Základní rozdělení paliv může být podle několika kritérií:



Obr. 2.2: Paliva (uhlí, ropa, zemní plyn, biomasa) [4,5,6,7]

- **podle stáří:** fosilní, stará (uhlí, ropa, zemní plyn)
recentní, mladá (dřevo, biomasa), mají neutrální emise CO_2
- **podle skupenství:** pevná
kapalná
plynná

- **podle původu:** přírodní (uhlí, ropa, zemní plyn, dřevo)
umělá (koks, LTO, TTO)

2.1.1 Plynná paliva

Jedná se prakticky o všechny plyny, které obsahují hořlavou složku, **vodík – H, oxid uhelnatý – CO a uhlovodíky – C_xH_y** , jediným parametrem, podle kterého můžeme topné plyny dělit je výhřevnost Q_i^r :

- málo výhřevné – $Q_i^r < 8,35 \text{ MJ/m}^3$ (vysokopecní plyn, dřevoplyn, ...)
- středně výhřevné – $8,35 < Q_i^r < 12,25 \text{ MJ/m}^3$ (vodní plyn, ...)
- velmi výhřevné – $12,25 < Q_i^r < 20,8 \text{ MJ/m}^3$ (svítiplyny, směsné plyny)
- velmi vysoce výhřevné – $Q_i^r > 20,8 \text{ MJ/m}^3$ (zemní plyn, propan-butan)

Popeloviny nejsou v topných plynech obsaženy vůbec, naopak voda se může do paliva přimísit při těžbě, dopravě nebo skladování.

2.1.2 Kapalná paliva

Jedná se o paliva na bázi ropy, což je složitá směs uhlovodíků (C_xH_y) s příměsí síry, vody a malého množství tuhých nečistot. Z ropy poté získáváme jednotlivé druhy kapalných paliv pomocí procesu, který se nazývá frakční destilace a spočívá v oddělení jednotlivých produktů na základě rozdílných teplot varu. Nejlehčí paliva se používají jako motorová paliva (benzín, nafta) a nejtěžší paliva se používají v energetice (LTO - lehké topné oleje, TTO - těžké topné oleje a mazut), výhřevnosti jednotlivých kapalných paliv se moc neliší a pohybují se kolem 42 MJ/kg.

U kapalných paliv můžeme najít nepatrné množství popelovin ve formě minerálních látek a alkalických kovů ve formě chloridů (vanad způsobuje vysokoteplotní korozi). Voda je u kapalných paliv vždy příměs a do paliva se může dostat při těžbě, dopravě nebo skladování, bývá zdrojem provozních potíží, proto je nutné ji z paliva odstranit.

2.1.3 Pevná paliva

Do této kategorie patří všechny typy tuhých fosilních paliv (antracit, koks, černé uhlí, hnědé uhlí, lignit, rašelina) a biomasa (dřevo, sláma, seno). U tuhých fosilních paliv závisí výhřevnost hlavně na geologickém stáří paliva. Platí, že čím starší palivo je, tím vyšší výhřevnost dostaneme jeho spálením, podle výhřevnosti je můžeme seřadit od nejvýhřevnějších:

- antracit (téměř čistý uhlík) – 33 MJ/kg
- koks – 29 MJ/kg
- černé uhlí – 18-30 MJ/kg
- hnědé uhlí – 8-25 MJ/kg
- lignit (nejmladší hnědé uhlí) – 6-9 MJ/kg
- rašelina – 5-8 MJ/kg.

Biomasu můžeme rozdělit na záměrně pěstovanou, která nemá jiné než energetické využití, a na odpadní, ta je produkována z jiných odvětví průmyslu. Výhřevnost u biomasy závisí na typu spalované biomasy a na jejím obsahu popelovin, většinou se ale pohybuje kolem 15-16 MJ/kg.

Oproti kapalným a plyným palivům mají pevná paliva výhřevnost nižší, protože obsahují větší množství popelovin a vodu. Čím vyšší obsah těchto složek v palivu tím nižší má výhřevnost.

2.1.4 Složení pevných paliv

Hořlavina h^r : do hořlaviny řadíme **uhlík – C, vodík – H, síru – S, dusík – N, kyslík – O**. Můžeme ji rozdělit na prchavou hořlavinu, což jsou těkavé organické látky, které se uvolňují při ohřevu paliva ve spalovací komoře, a na pevnou (fixní) hořlavinu, která začíná hořet až po dosažení určité teploty. V prchavé hořlavině je obsažena tzv. okludovaná voda, ta už se nezapočítává do množství vody v palivu.

Voda W^r : v palivu je třeba rozlišovat několik druhů vody. Vodu přimísenou, která se dá z paliva odstranit mechanicky. Dále vodu hrubou, pro její odstranění postačí sušení paliva při 20 °C. Vodu kapilárně vázanou v palivu, ta už se musí odstraňovat při teplotách vyšších než je bod varu vody. A nakonec vodu hydrátovou, kterou nelze odstranit, protože je součástí minerálů.

Popelovina A^r : popelovinou v pevných palivech jsou myšleny minerální látky (CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , ...), po procesu hoření z nich zůstanou pouze nespalitelné oxidy (CaO , FeO , SiO_2 , ...) a prvky (Zn, Pb, As, Ni, ...), které tvoří odpad ze spalování což je popel, popílek, škvára nebo struska.

PALIVO							
Voda přimísená	VODA W^r		SUŠINA				
	Voda hrubá	Voda vázaná	POPELOVINA A^r			HOŘLAVINA h^r	
			Popel	Hydrátová voda	Prchavý podíl	Prchavá hořlavina	Fixní hořlavina
Voda volná			Škvára	Popílek		Zdánlivá hořlavina	

Obr. 2.3: Složení pevných paliv [9]

2.2 Statika spalování

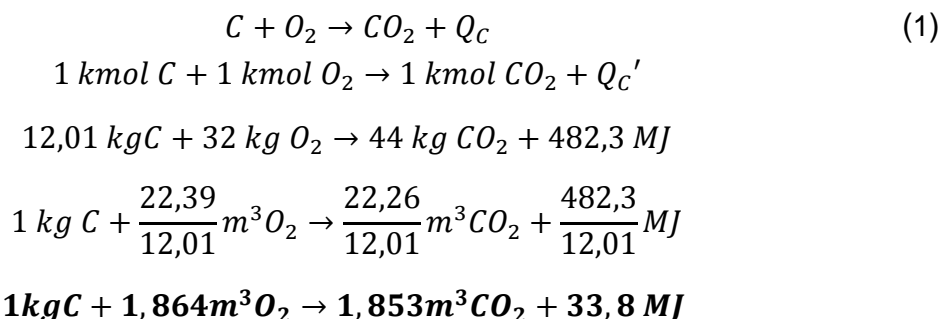
Statika spalování se zabývá pouze spalováním jako celkem. Důležité je to, co do procesu spalování vstupuje a co z něj vystupuje. Co se děje při samotném procesu spalování, je z pohledu statiky spalování nepodstatné. Aby mohl probíhat proces spalování paliva tak jak má a s co největší účinností, je nutné zajistit alespoň minimální potřebné množství spalovacího vzduchu dodávané do spalovací komory. Tomuto množství se říká stechiometrické množství.

Stechiometrické množství spalovacího vzduchu se určuje ze stechiometrických rovnic, ty jsou stejné pro tuhá a kapalná paliva, kde jsou hořlavé složky (C, H, S) a nehořlavé složky (O, N, W^r , A^r). A odlišné jsou pro plyná paliva, která mají složky hořlavé (H_2 , CO, C_xH_y), nehořlavé (N_2 , O_2 , S, Ar).

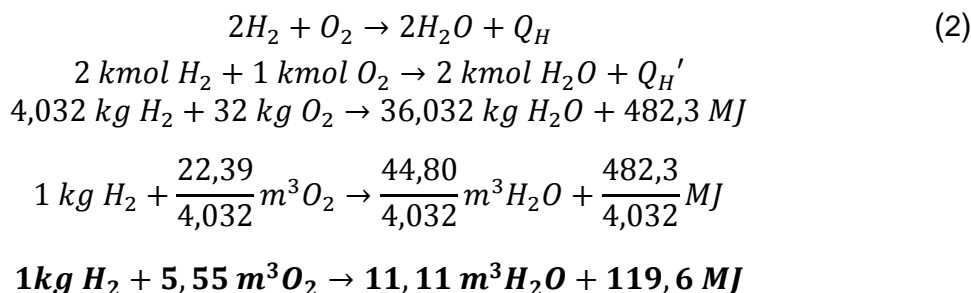
2.2.1 Výpočet množství spalovacího vzduchu pro pevná a kapalná paliva

Nejdřív je nutné určit, kolik kyslíku je potřeba pro spálení 1 kg jednotlivých složek hořlaviny v daném palivu.

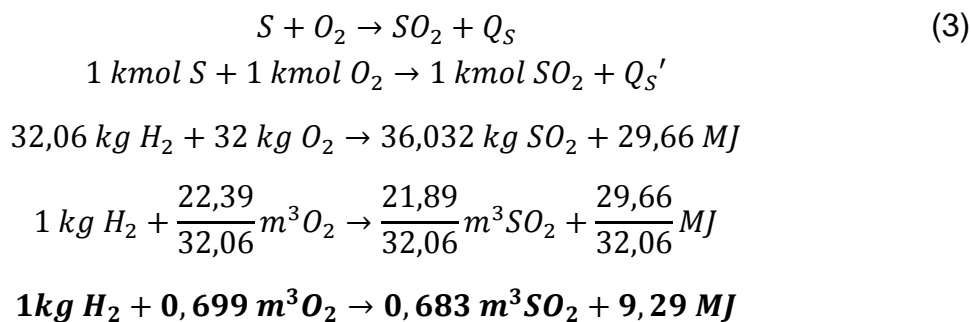
- Množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg uhlíku C [1]



- Množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg vodíku H₂ [1]



- Množství kyslíku potřebné pro spálení 1 kg síry S [1]



2.2.2 Výpočet objemu vzduchu

Následně se určí, kolik bude potřeba vzduchu pro spalování zvoleného paliva, které má konkrétní složení hořlaviny. Výpočet se provádí ve třech krocích.

- Minimální množství kyslíku [1]

$$V_{O_2 \min} = \frac{22,39}{12,01} C^r + \frac{22,39}{4,032} H_2^r + \frac{22,39}{32,06} S^r - \frac{22,39}{32} O_2^r \left[m_{O_2}^3 / kg_{pal} \right] \quad (4)$$

- Minimální spotřeba suchého vzduchu [1]

$$V_{Vzmin}^S = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2min} [m_{Vz}^3/kg_{pal}] \quad (5)$$

- Minimální spotřeba vlhkého vzduchu [1]
Faktor poměrného zvýšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry
 $f = 1,005 - 1,02$

$$V_{Vzmin} = f \cdot V_{Vzmin}^S [m_{Vz}^3/kg_{pal}] \quad (6)$$

2.2.3 Spalování s přebytkem vzduchu

Stechiometrické množství vzduchu je pouze teoretické množství, pro které předpokládáme dokonalé promísení paliva s dodávaným spalovacím vzduchem. Toho však v reálných podmínkách v praxi není možné dosáhnout a dochází k nedokonalému spalování.

Z tohoto důvodu je nutné přivádět větší než stechiometrické množství vzduchu a mluvíme o spalování s přebytkem vzduchu.

Zavádí se součinitel přebytku vzduchu α . [1]

$$\alpha = \frac{V_{vzd\ skutečné}}{V_{vz\ min}} = \frac{\alpha \cdot V_{vz\ min}}{V_{vz\ min}} [-] \quad (7)$$

Hodnota součinitele pro stechiometrické množství je $\alpha = 1$. Na druhou stranu se nesmí součinitel přebytku vzduchu volit příliš vysoký, aby zbytečně nedocházelo ke zvyšování objemu spalín a komínové ztráty a tím ke snižování účinnosti spalování.

V praxi se součinitel přebytku vzduchu určuje na konci ohniště, aby byl zajištěn dostatek spalovacího vzduchu v celém prostoru ohniště. Označuje se α_0 a jeho hodnoty jsou tabelovány pro různé typy ohnišť.

Typ ohniště	Součinitel přebytku vzduchu α_0
Na plynná paliva	1,01 – 1,10
Na kapalná paliva	1,05 – 1,15
Práškové výtavné	1,15
Práškové granulační	1,20
Fluidní	1,25 – 1,40
Roštové	1,25 – 1,50
Lokální topeniště	1,50 – 3,00

Tab. 2.1 – Součinitel přebytku vzduchu [1]

Při volbě přebytku spalovacího vzduchu musíme vzít v úvahu také přísávání falešného vzduchu. Tento jev je nežádoucí a vzniká v důsledku podtlaku v kotli na pevná a kapalná paliva, kdy dochází k nasávání okolního vzduchu netěsnostmi v konstrukci kotle. Zvyšuje se objem spalín a dochází k ochlazení spalín.

Proto se určuje ještě přebytek vzduchu v komíně, kde je součinitel přebytku vzduchu větší o falešný vzduch. [1]

$$\alpha_k = \alpha_0 + \Delta\alpha [-] \quad (8)$$

2.2.4 Složení spalin

Spaliny jsou plynné odpadní produkty vznikající při procesu spalování. Vznikají při reakci paliva se spalovacím vzduchem. Jsou tvořeny plyny, parami a jemnými tuhými částicemi.

Plynná část spalin bývá tvořena oxidem uhličitým, oxidy síry, dusíkem a oxidy dusíku, argonem, xenonem, kryptonem, ale i přebytečným kyslíkem ze spalovacího vzduchu, a při nedokonalém spalování se může ve spalínách objevit také oxid uhelnatý nebo uhlovodíky.

Páry ve spalínách jsou z největší částí tvořeny vodní parou, která vzniká jednak odpařováním vlhkosti z paliva, dále spalováním uhlovodíků a vodíku obsažených v palivu a část pochází z vzdušné vlhkosti, která je obsažena ve spalovacím vzduchu. Mohou se však objevit páry kyselin, například páry kyseliny sírové, které vznikají reakcí oxidů síry s vodní parou. Páry kyseliny sírové jsou nežádoucí a způsobují snížení rosného bodu spalin a po kondenzaci nízkoteplotní korozi v tazích komína.

Tuhé částice jsou součástí spalin zejména při spalování tuhých paliv. Množství tuhých částic ve spalínách závisí na popelnatosti paliva. Jedná se o jemné částičky unášené proudem spalin, v tazích kotle mohou tvořit nánosy a tím zhoršovat přestup tepla, a také způsobují abrazi teplosměnných ploch, když je při průletu obrušují. Mohou se objevit ve třech fázích, výskyt jednotlivých fází závisí na teplotě spalin:

- v tuhé fázi se může jednat o saze, popelový prach, struskový aerosol, nebo škvárová zrna
- v kapalně fázi se jedná o tekutou strusku
- jako páry jsou to sloučeniny fosforu, draslíku a sodíku

Složení spalin je velmi závislé na složení paliva (na poměru množství hořlaviny, popeloviny a vody), dále může být složení spalin ovlivněno teplotou spalování a dokonalostí průběhu spalování [11,12].

2.2.5 Výpočet objemu spalin

Objem spalin je důležitý pro dimenzování spalinovodu na takové rozměry, aby byla udržována rozumná rychlost spalin. Pro určení celkového objemu spalin musíme sečíst objemy jednotlivých složek spalin. Složky spalin, které počítáme, jsou oxid uhličitý, oxid siřičitý, dusík, argon, vodní pára. Ostatní složky jsou zastoupeny jen nepatrně, a tak je zanedbáváme.

- Objem suchých spalin [1]

$$V_{smin}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} [m_{ss}^3/kg_{pal}] \quad (9)$$

- Výpočet objemu jednotlivých složek

CO₂ z uhlíku v hořlavině + ze vzduchu [1]

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,1} \cdot C^r + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{Vmin}^S [m_{O_2}^3/kg_{pal}] \quad (10)$$

SO₂ ze síry v hořlavině [1]

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S [m_s^3/kg_{pal}] \quad (11)$$

N₂ z dusíku v hořlavině + ze vzduchu [1]

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,013} N_2 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{Vmin}^S [m_{N_2}^3/kg_{pal}] \quad (12)$$

Ar ze vzduchu [1]

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{Vmin}^S [m_{Ar}^3/kg_{pal}] \quad (13)$$

H₂O z hořlaviny + z vlhkosti+ ze vzduchu [1]

$$V_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} H_2 + \frac{22,4}{18,015} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{Vmin}^S [m_{H_2O}^3/kg_{pal}] \quad (14)$$

- Objem vlhkých spalín [1]

$$V_{Smin} = V_{Smin}^S + V_{H_2O} [m_{sp}^3/kg_{pal}] \quad (15)$$

Objem některých složek je dále možné použít při určování množství produkovaných emisí znečišťujících látek.

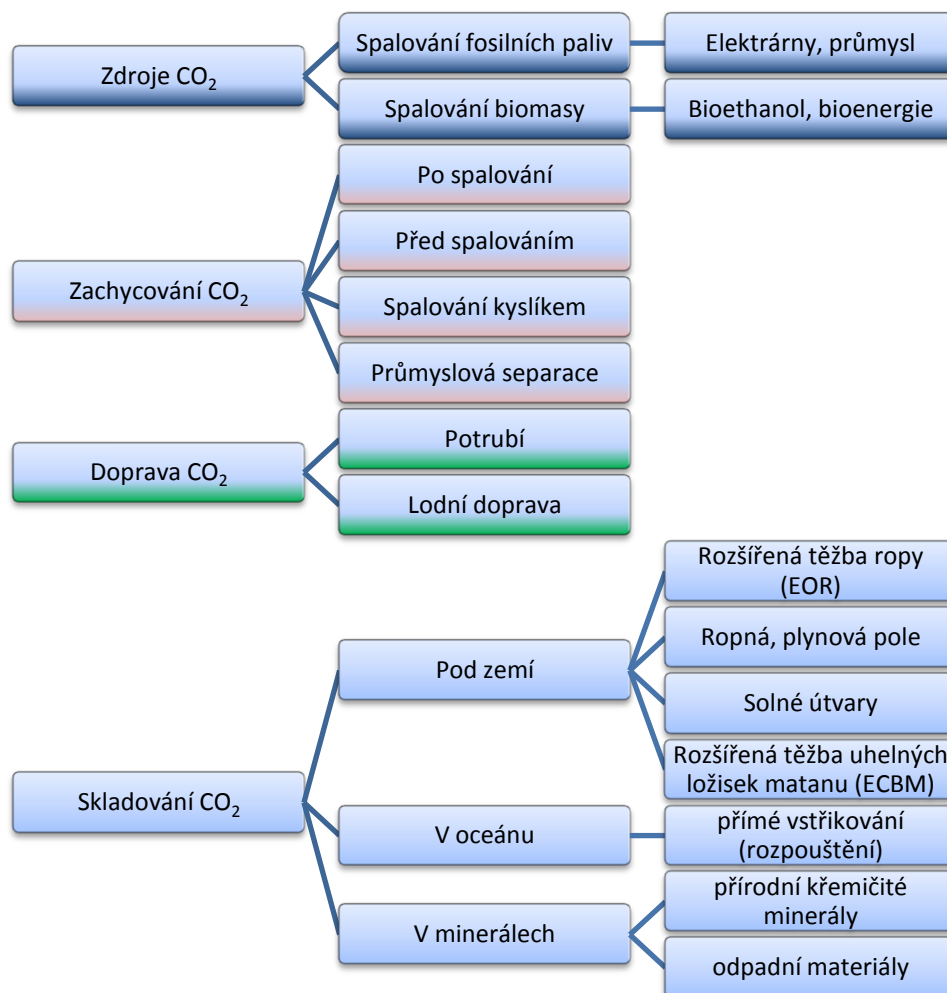
3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Znečišťující látky je možné rozdělit do dvou skupin podle toho, jak vznikají. První skupinou jsou primární polutanty (SO_2 , CO , CO_2 , NO_x , C_xH_y , TZL, těžké kovy), vznikají přímo jako produkty spalování. Druhá skupina se nazývá sekundární polutanty (fotochemické oxidy, uhlovodíky, oxidy, ozón) a vznikají působením slunečního záření na primární polutanty.

3.1 Plynné znečišťující látky

3.1.1 CO_2 – oxid uhličitý

Jedná se o bezbarvý plyn ostré chuti, má hustotu $\rho = 1,97 \text{ kg/m}^3$ a je těžší než vzduch, ve směsi se vzduchem se drží u země. Vzniká jako produkt dokonalého spalování. Žádné zdravotní důsledky zatím nebyly prokázány, jedná se však o skleníkový plyn způsobující skleníkový efekt a tím se podílí na globálním oteplování planety. V důsledku odlesňování planety dochází k nárůstu jeho koncentrace v atmosféře.



Obr. 3.1: Schéma nakládání s CO_2 [13]

V současné době je snaha omezit množství vypouštěného oxidu uhličitého do ovzduší a hledají se možná technická řešení jeho omezování. Jedním z nich je možnost čerpání oxidu uhličitého do podzemních jeskyní, kde by zůstal do té doby, než by byl vynalezen jiný způsob jeho využití [8,14].

Rovnice dokonalého spalování uhlíku [3]:



3.1.2 CO – oxid uhelnatý

Je to plyn bez chuti a zápachu, má hustotu $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, podobnou jako vzduch ($\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$), proto je ve směsi se vzduchem rovnoměrně rozptýlen v prostoru. Tato skutečnost je velice nebezpečná, protože se jedná o jedovatý plyn (krevní jed – váže se na hemoglobin a zabírá tím místo kyslíku). Vzniká jako produkt nedokonalého spalování organických látek při nedostatku spalovacího vzduchu.

Hlavními zdroji jsou výfuky dopravních prostředků, domácí topeniště, hnědouhelné lomy. Vzniká také nezávisle na lidské činnosti, a to při lesních požárech nebo při sopečné činnosti.

Jeho vzniku se dá předejít správnou volbou přebytku vzduchu [8,14].

Rovnice nedokonalého spalování uhlíku [3]:



3.1.3 SO₂, SO₃ – oxid siřičitý, oxid sírový

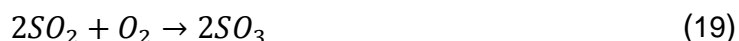
Oxidy síry jsou ve spalínách obsaženy v poměru 99 % SO₂ a 1 % SO₃.

Oxid siřičitý je bezbarvý plyn štiplavého zápachu, který je těžší než vzduch a má hustotu $\rho = 2,93 \text{ kg/m}^3$. Dobře se rozpouští ve vodě a organických rozpouštědlech. Vzniká spalováním organické složky síry obsažené v palivu (tvoří asi 50 % síry), která je spalitelná, a tak přechází do spalín.

Má negativní dopady na zdraví, hlavně na průdušky a plíce, způsobuje respirační potíže. Jeho vliv na životní prostředí je také negativní, protože se podílí na vzniku kyselých dešťů. Dále je součástí smogu londýnského typu (smog způsobený spalováním uhlí). Co se týče hmotných škod, způsobuje korozi materiálů.

Z oxidu siřičitého může vzniknout oxid sírový, který má stejné dopady jako oxid siřičitý, navíc způsobuje provozní potíže při spalování. Při reakci s vodou vzniká kyselina sírová, která má nižší teplotu rosného bodu a způsobuje nízkoteplotní korozi teplosměnných ploch v posledních tazích kotle [8,14].

Rovnice pro vznik kyseliny sírové [3]:



Množství vznikajících oxidů síry lze redukovat tím, že se omezí používání sirnatých paliv nebo se musí palivo před spalováním odsiřovat, což je však složité a nákladné, proto se tato metoda moc nepoužívá. V technické praxi je proto jednodušší spalovat palivo s obsahem síry a odsiřovat až spaliny, které vystupují ze spalovacího procesu.

3.1.4 Oxidy dusíku NO_x

Z oxidů dusíku vznikajících při procesu spalování převažuje oxid dusnatý NO nad oxidem dusičitým NO₂ (v poměru 95 % NO, 5 % NO₂). Oxidy dusíku můžeme rozdělit na palivové NO_x, termické NO_x a promptní NO_x.

Palivové NO_x vznikají z dusíku obsaženého v palivu při spalování uhlí a topných olejů.

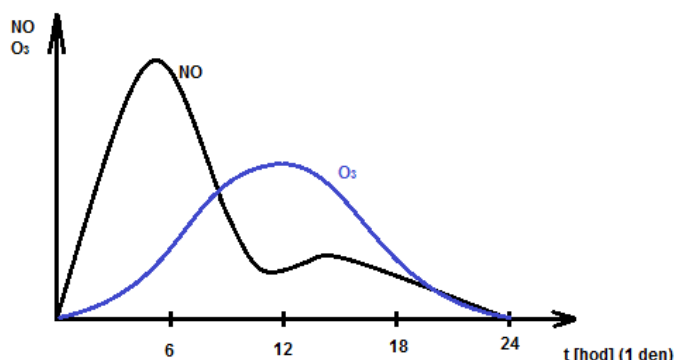
Termické NO_x vznikají z dusíku, který je obsažený ve spalovacím vzduchu a vznikají převážně při spalování zemního plynu, při spalování uhlí a topných plynů tvoří jen malou část [8,14].

Reakce vzniku termických NO_x při teplotách nad 1200 °C [3]:



Promptní NO_x vznikají jiným mechanismem, reakcí zbytků uhlovodíkových radikálů se vzduchem, formují se na frontě hoření. Jejich množství je velmi malé, proto je zanedbáváme.

Oxidy dusíku způsobují respirační potíže. A co se týče dopadů na životní prostředí, podílí se na vzniku kyselých dešťů a má vliv na nárůst koncentrace ozónu v atmosféře [8].



Obr. 3.2: Vliv dopravy na množství NO a O₃ v atmosféře [3]

3.1.5 O₃ – ozón

Ozón se primárně nachází ve stratosféře ve výšce kolem 20 km, kde tvoří ozónovou vrstvu, která chrání planetu před nebezpečným ultrafialovým zářením. Naopak troposférický ozón, který se vyskytuje do výšky 10 až 11 km, je toxický a jeho přebytek způsobuje poškození jehličnatých stromů a také se podílí na tvorbě fotochemického smogu [8].

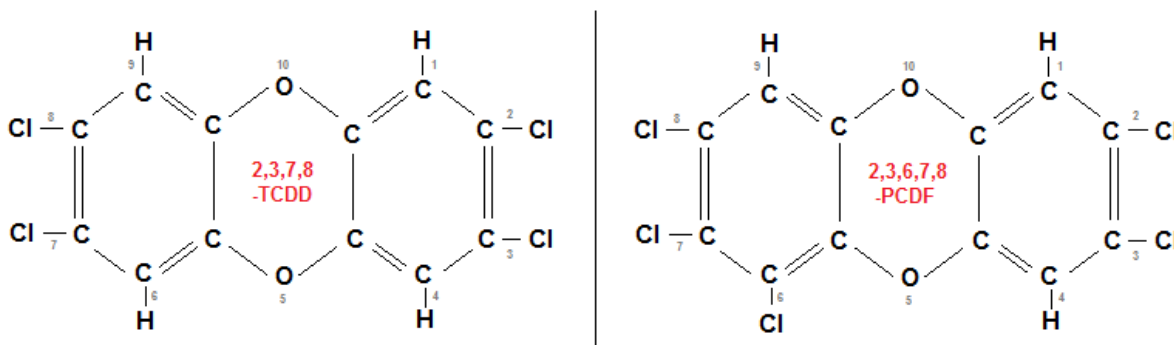
Rovnice vzniku a rozpadu ozónu [3]:



3.1.6 Dioxiny a Furany

Jedná se o sloučeniny obsahující atomy uhlíku, kyslíku, vodíku a chloru, můžeme se setkat s velkým množstvím struktur těchto látek.

Tetrachlor dibenzodioxin zkráceně označován 2,3,7,8-TCDD je nejtoxičtější látka, která kdy byla vyráběna. Byl používán v herbicidech a pesticidech. Podle této látky se počítá ekvivalent toxicity, který je roven 1. Všechny ostatní toxické látky, které měříme ve spalínách, se počítají přes ekvivalent toxicity a mají ho nižší než 1. Například pentachlor dibenzofuran (2,3,6,7,8-PCDF) má ekvivalent toxicity roven 0,5 [8,14].



Obr. 3.3: Molekuly TCDD a PCDF [3]

Polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF) jsou toxické a mutagenní látky, které vznikají jako nežádoucí produkty při nedokonalém spalování, za přítomnosti aromatických uhlovodíků a chloridů:

- výfuky spalovacích motorů
- spalovny průmyslových odpadů
- elektrárny na fosilní paliva
- spalování odpadů v lokálních topeništích
- spalování kalů
- spalování PCB (polycyklické bifenyly – obsažené v izolačních barvách a nátěrech
- výroba herbicidů
- celulózky a papírny – bělvalo se chlórem
- metalurgické provozy – slévárny, ocelárny, hutě

Vznikají při teplotách nad 600 °C, nad teplotou 800 °C, se jich třetina rozpadne a čím vyšší teplota je, tím rychleji dochází k rozpadu. Proto je ve spalovnách nutnost dodržovat předpis, že po posledním přívodu vzduchu do spalovacího procesu setrvá teplota spalin minimálně po dobu 2 sekundy nad 850 °C při spalování komunálního odpadu a nad 1100 °C při spalování průmyslového odpadu.

Pokud jde o dopady na zdraví a životní prostředí, nebezpečí tkví v tom, že poté co se dostanou do životního prostředí, mohou se šířit jak v plynné formě, tak být absorbovány v malých částicích. Jedná se o velmi stabilní látky, a proto je možný jejich transport na velké vzdálenost. Do těla se dostávají jednak inhalací na drobných částicích, ale protože jsou rozpustné v živočišných tucích, je možné je zkonzumovat v kontaminovaném jídle. Pro zdraví člověka jsou látky velmi nebezpečné, již v malých koncentracích. Způsobují nevolnost, bolest hlavy, poškození jater, kůže. Závažnější je zvýšené riziko onemocnění rakovinou nebo poškození zdravého vývoje plodu. Lidské tělo potřebuje 6 až 10 let k odbourání těchto látek z organismu, přičemž zdravotní

komplikace mohou nastat již při konzumaci 70-150 pg/den, dovolené hodnoty vypouštěných látek jsou však daleko nižší (podle nej přísnější americké normy EPA je to 0,006 pg na den a na 1 kg živé váhy).

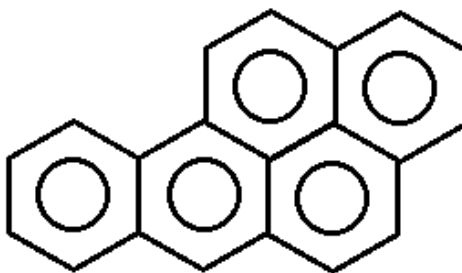
Snížení koncentrace PCDD a PCDF ve spalínách lze docílit:

- úplným a dokonalým spalováním
- odprášením spalin
- dokonalým smísením se vzduchem během spalování
- rychlým ochlazením spalin [8,14]

3.1.7 Polycyklické aromatické uhlovodíky – PAH (PAU)

Představují širokou skupinu různých látek (je jich známo více jak 100), společným znakem je to, že obsahují minimálně 3 benzenová jádra. Sloučeniny jsou bílé nebo nažloutlé krystalické pevné látky. Rozpustné v tucích a olejích, naopak nejsou rozpustné ve vodě. Jsou velice stabilní, a proto je možný transport v atmosféře na velké vzdálenosti.

Nejznámějším příkladem je benzo(a)pyren, což je velmi silný karcinogen a jeho významným zdrojem je cigaretový kouř [8,14].



Obr. 3.4: Molekula benzo(a)pyrenu [3]

PAH vznikají při nedokonalém spalování organických látek obsažených v palivu (uhlí, olej, benzín, nafta, dřevo):

- spalování v lokálních topeništích
- koksárny
- spalovací motory
- výroba hliníku
- při pyrolýze vznikají radikály uhlovodíků [8,14]

Dopad na životní prostředí má jejich reakce s oxidy dusíku, při této reakci se tvoří nitro-PAH a ty jsou součástí smogu.

Celá řada těchto látek znamená velké zdravotní riziko, především riziko rakoviny a poruchy vývoje plodu. Dále pak mohou způsobovat podráždění nebo popálení kůže, což může při opakované expozici způsobit ztenčení pokožky.

Snížení koncentrace PAH lze podobně jako u dioxinů a furanů dosáhnout dokonalým spalováním, dokonalým promísením se spalovacím vzduchem a správnou teplotou spalovacího procesu [8,14].

3.2 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Jako tuhé znečišťující látky označujeme částice různé velikosti, které poté co opustí znečišťující zdroj a dostanou se do ovzduší, setrvávají v něm a jsou schopné transportu na velké vzdálenosti.

Zdroje produkující tuhé znečišťující látky:

- antropogenní – spalování, jakákoliv činnost, při které dochází k dělení materiálu
- přírodní – lesní požáry, sopečná činnost, eroze hornin

Částice jsou rozděleny do skupin podle velikosti, tyto skupiny jsou zaváděny ze zdravotnického hlediska. Velikost je dána podle aerodynamického průměru částic. Jednotlivé skupiny jsou označovány PM_x , x udává velikost částic v mikrometrech (např. PM_{10} , $PM_{2,5}$, ...).

Další možné rozdělení částic podle velikosti je na jemnou a hrubou frakci. Za jemnou frakci lze považovat částice od nejmenší měřitelné velikosti kolem 3 nm a menší než 1 μm (PM_1), jde o jemné částice a ultrajemné částice, větší částice už se řadí do hrubé frakce.

Velikost však není jedinou vlastností, kterou se od sebe částice jemné a hrubé frakce liší, rozdílné je i jejich chemické složení, mechanismus vzniku, způsob odstraňování z atmosféry a také dopady na živé organismy. Proto není možné pro zjištění koncentrace jedné frakce vycházet z koncentrace frakce druhé. Podle Světové zdravotnické organizace je proto nutné posuzovat a vyhodnocovat tyto frakce odděleně [10,14,15]

3.2.1 Tvorba TZL při spalování

Na tvorbu tuhých znečišťujících látek při spalovacím procesu má vliv několik faktorů:

- podmínky spalování (teplota, promíchávání, režim spalování, přebytek vzduchu, ...)
- vlastnosti paliva (vlhkost, granulometrie, popelnatost, ...)
- typ spalovacího zařízení

TZL, které jsou produktem spalování, se skládají ze směsi plynů, par a částic obsažených v plynu. Většina vzniklých částic spadá do jemné frakce (PM_1 – částice menší než 1 μm). Částice jemné frakce, se formují z elementů vypařovaných během procesu spalování, poté co se dostanou na bod sytosti, začínají vznikat ultrajemné částice. Jedná se o mechanismus nukleace (vznikají zárodky nové fáze, jedná se o prvotní shluky atomů). Po dosažení určité velikosti tyto částice dále rostou, ale již pomocí jiného mechanismu. Mohou narůstat koagulací (shlukování koloidních a makromolekulárních organických částic do větších celků), aglomerací (spojování do větších celků na základě lepivosti povrchů) nebo reakcemi kondenzace na povrchu.

Částice hrubé frakce, tj. větší než 1 μm , jsou tvořeny především částicemi popele, které mají nízký tlak par, a proto se v průběhu spalování nevypařují.

Na velikosti částic závisí, jak dlouho se budou držet v ovzduší, než se usadí na povrchu země. Obecně platí, že čím menší částice jsou, tím déle zůstávají. Například částice menší než jeden mikrometr už jsou tak drobné, že mohou v ovzduší setrvávat i několik týdnů dokud je nespláchne déšť [10,14,15].

Dalším možným kritériem, podle kterého je možné částice rozdělit je místo vzniku částic. Jednak to může být za vysokých teplot ve spalovací zóně, potom se

jedná o primární částice. Nebo to může být až v kouřové vlečce, a v atmosféře a to jsou sekundární částice.

Primární částice lze dále dělit podle toho, jak vznikají, na popílek, saze a organické částice. Popílek je tvořen nespalitelnou složkou paliva, naopak saze a organické částice vznikají jako produkt nedokonalého spalování hořlaviny při nedostatku spalovacího vzduchu, kdy část hořlavé složky paliva není využita a odchází se spaliny [10].

3.2.2 Popílek

Ve spalovacím procesu musíme od sebe rozlišovat popel a popílek. Popel jsou nespalitelné anorganické části paliva, které zůstávají po procesu spalování v propadu spalovacího zařízení, a popílek jsou drobné částice, které jsou ze spalovacího zařízení unášeny proudem spalin.

Množství vznikajícího popílku je závislé na množství popeloviny v palivu a na jejím chemickém složení. Čím méně kvalitní palivo je, tím více popelovin obsahuje a tím více vzniká popílek. Biomasa obsahuje více popeloviny než fosilní paliva.

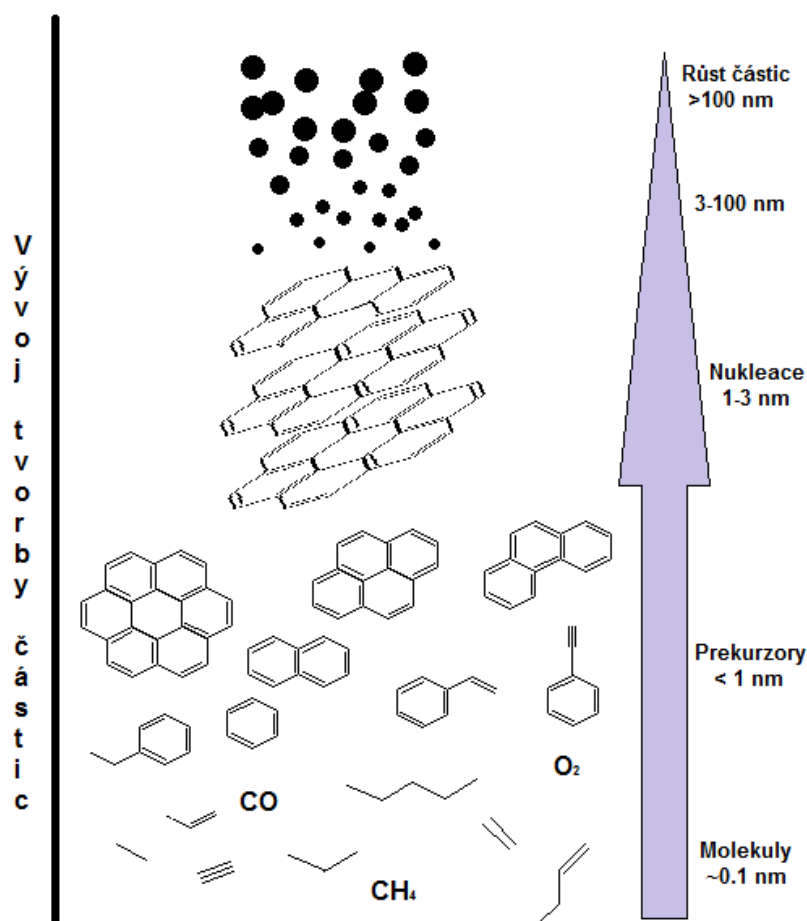
Popílek tvoří velmi jemné částice, největší zastoupení mají částice o velikosti 0,01 až 0,2 mm. Ve velkých elektrárnách je nezbytné odlučovací zařízení, které velkou část těchto částic zachytí a tím zabrání jejich úniku do ovzduší. Do ovzduší odchází jen velmi jemné částice, které zatím není možné ze spalin odstranit.

Popílek, který se dostane do ovzduší, způsobuje poměrně velké škody. Má negativní dopady na zdraví obyvatelstva, tím že poškozují dýchací ústrojí a tím že se při jeho vdechování do organismu dostávají toxické a karcinogenní látky. V lesnictví způsobuje likvidaci jehličnanů, v zemědělství působí negativně na růst zemědělských plodin a tím ovlivňuje jejich výslednou kvalitu [10,16].

3.2.3 Saze

Saze vznikají při nedokonalém spalování v plameni, v místech, která jsou bohatá na palivo, hořením prchavé hořlaviny v palivu (uhlovodíky). Největší pravděpodobnost tvorby sazí nastává, když je při spalování poměr C/O větší než 0,5-0,8.

Tvorba sazí začíná na molekulární úrovni, prvním znakem vzniku sazí je přítomnost jednoduchých polycyklických aromatických uhlovodíků (benzen, naftalen). Tyto molekuly dále rostou, přidávají se další aromatická jádra a vytvářejí se složitější PAU, tyto PAU mají v podstatě dvourozměrnou strukturu a jedná se o tzv. prekurzory, z nichž nukleací vznikají zárodky sazí. Ze zárodků o velikosti okolo 3 nm poté koagulací, povrchovým růstem, srůstáním nebo oxidací rostou částice sazí. Výsledkem jsou saze tvořené elementárními nanočásticemi uhlíku, velikosti částic se pohybují od 5 do 100 nm. Tyto částice následně dále rostou a vytvářejí větší 3D struktury o velikosti stovek nm [10,13].



Obr. 3.5: Model vzniku sazí [13]

3.2.4 Organické částice

Při procesu spalování se vytváří velké množství organických sloučenin s odlišným parciálním tlakem par. Tyto sloučeniny se následně mohou adsorbovat na částice jemné frakce nebo mohou kontaminovat půdy a podzemní vody. Organické sloučeniny jsou těkavé a mají negativní vliv na zdraví člověka, zejména ovlivňují nervový systém, ale mohou být i toxické, karcinogenní, mohou způsobovat alergie a také způsobují podráždění očí a sliznic. Dále působí toxicky na rostliny tím, že ovlivňují vývin kořenového systému a zpomalují tak jejich růst.

Organické látky můžeme podle těkavosti rozdělit na těkavé a polo-těkavé. Při spalování biomasy je hlavním představitelem těkavých látek metan. V případě, že organické látky metan neobsahují, jedná se o nemetanové těkavé organické látky (NMVOC). Koncentrace těchto látek vypouštěných do ovzduší se musí hlídat případně hlásit.

Jako těkavé látky lze označit látky s parciálním tlakem par 133,3 Pa při teplotě 20 °C, tato hodnota odpovídá přibližně teplotě varu pod 150 °C. Jedná se zejména o bezbarvé látky, některé jsou bez zápachu, naopak jiné silně zapáchají [10,14].

Do skupiny NMVOC se řadí tyto chemické skupiny:

- alkoholy
- aldehydy
- ketony
- alkany
- aromáty
- halogenové deriváty výše zmíněných [14]

4 ÚČINKY ULTRAJEMNÝCH ČÁSTIC NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Částice se do lidského organismu mohou dostat několika cestami. V malé míře je to pozřením těchto částic společně s potravou, dále se mohou dostat do organismu kůží, ale nejčastější způsob je vniknutí do organismu dýchacím ústrojím.

Škodlivost částic je ovlivněna zejména velikostí, tvarem a chemickým složením částic. Tyto vlastnosti závisí na emisním zdroji daných částic.

Velikost částic ovlivňuje především to, jak hluboko se dané částice v lidském organismu dostanou a kde se poté mohou začít ukládat, popřípadě mohou způsobit nějaké zdravotní komplikace. Čím menší částice tím hlouběji do organismu se mohou dostat. Právě ze zdravotního hlediska bylo zavedeno označování velikosti částic PM_x (částice menší než x mikrometrů).

Částice větší než $10\ \mu m$ jsou většinou zachyceny již v ústech nebo nosní sliznici, tyto částice mohou být částečně spolknuty nebo je lze vykašlat. Menší částice jsou označovány jako vdechovatelné (inhalabilní) a mohou se dostávat dále do dýchacího ústrojí [10,14,15].



Obr. 4.1: Průnik jemných částic do plic [17]

4.1 Částice PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 , $PM_{0,1}$

Částice označované jako PM_{10} , odborně nazývané extrathorakální frakce, jsou částice do průměru $10\ \mu m$, ty se také usazují v horních dýchacích cestách a mohou se dostávat i do průdušek a usazovat se tam. Možné je i jejich vniknutí do vzdálenějších částí dýchacího ústrojí, ale to jen v případě, pokud dojde k hlubšímu nádechu.

Částice menší, označované jako $PM_{2,5}$ a PM_1 , odborně nazýváme tracheobronchiální frakce, pronikají hlouběji do průdušek. Respirabilní frakce, tedy částice $PM_{0,1}$, jsou schopné proniknout až do plicních sklípků, kde dochází k výměně dýchacích plynů [10].

4.2 Škodlivost částic

Jemné částice, které proniknou do průdušek a do plic, jsou škodlivé kvůli mechanickému zaprášení, kdy může dojít k mechanickému poškození sliznic a povrchu plic, to může způsobovat respirační potíže. Mohou způsobovat různé záněty dýchacích cest, menší částice obvykle způsobují rozsáhlejší záněty.

Mnohem větší nebezpečí při vdechování jemných částic, ale spočívá v chemickém složení vdechovaných částic. Částice hrubé frakce jsou tvořeny převážně z anorganických materiálů obsažených v zemské kůře (železo, hliník, vápník, ...). U částic jemné frakce je hlavní složkou uhlík a organické sloučeniny, které vznikají při procesu spalování. Nanočástice jsou složeny také z organických látek a těžkých kovů, mají však větší aktivní povrch, a tak jsou schopné vázat na sebe mnohem větší množství nebezpečných polutantů, jedná se o toxické a karcinogenní organické látky (např. olovo, chrom, arzen, mangan, kadmium, ...). Tyto látky se na částice adsorbují z okolního prostředí. Velký význam pro škodlivost a toxicitu má měrný povrch a tvar částic, podle výzkumů jsou částice, které mají větší měrnou plochu, reaktivnější. A jsou tím toxičtější, čím je větší poměr jejich stran a čím větší je poměr stran částic. Míra toxicity částic závisí na krystalické struktuře, protože i částice se stejným chemickým složením, ale rozdílnou strukturou, mohou mít na organismus odlišný vliv.

Nanočástice jsou mnohonásobně menší než buňky lidského těla, a proto je není možné přefiltrovat v plicích. Ve chvíli, kdy se dostanou dýchacími cestami až do plicních sklípků a tím do krevního řečiště, mohou se šířit po celém těle, pronikat do buněk. Škodlivé látky se tak mohou začít ukládat v lidských orgánech, zejména v těch, které vyžadují velké množství krve (plíce, srdce, játra, ...). Jelikož jsou částice tak malé, mohou proniknout přes nosní membránu a skrz čichové a lebeční nervy se mohou dostat až do centrálního nervového systému člověka.

Škodlivost nanočástic dále závisí na dávce škodlivin, které se dostanou do organismu, tato dávka je závislá na hmotnostní koncentraci jemných částic v ovzduší, v době, kdy dochází k vdechování takových částic.

Dlouhodobá expozice vysokým koncentracím jemných částic a nanočástic a jejich nadměrné vdechování může způsobovat:

- častější onemocnění dýchacích cest
- astma a plicní choroby
- rakovinu plic
- onemocnění srdce
- onemocnění cukrovkou, vysoký krevní tlak
- poškození nenarozených dětí [10,14,15]

5 MĚŘENÍ EMISÍ

5.1 Základní pojmy

Emise – tímto pojmem se označuje nezředěná koncentrace škodlivin, která je měřená přímo u zdroje znečištění, můžeme je rozdělit:

- hmotné – plyny, prachy, aerosoly (tuhé, kapalné)
- nehmotné – hluk, zápach, osvětlení

Imise – označujeme koncentraci škodlivin, která je naměřená v nějaké vzdálenosti od zdroje emisí.

5.2 Zdroje emisí:

- **přírodní** – způsobené přírodními jevy, nezávisle na činnosti člověka
 - produkce síry, chloru a polétavých částic při vulkanické činnosti
 - přírodní prach vzniká erozí hornin
 - oxid uhelnatý vzniká při lesních požárech
 - radon vzniká při radioaktivním rozpadu zemské kůry
 - metan produkují zvířata při trávení
- **způsobené činností člověka**
 - bodové – jedná se o stacionární průmyslová zařízení (elektrárny, teplárny, ...)
 - liniové – mobilní zdroje (dopravní prostředky na silnicích)
 - plošné – zastavěné oblasti (domácí topeniště)

5.3 Sledované emise

Mezi všemi znečišťujícími látkami, které vznikají při spalovacím procesu, je určitá skupina látek, které jsou celosvětově měřené a sledované, a dohlíží se na koncentraci těchto látek v ovzduší. Tyto látky se označují jako kritériální polutanty.

5.3.1 Kritériální polutanty

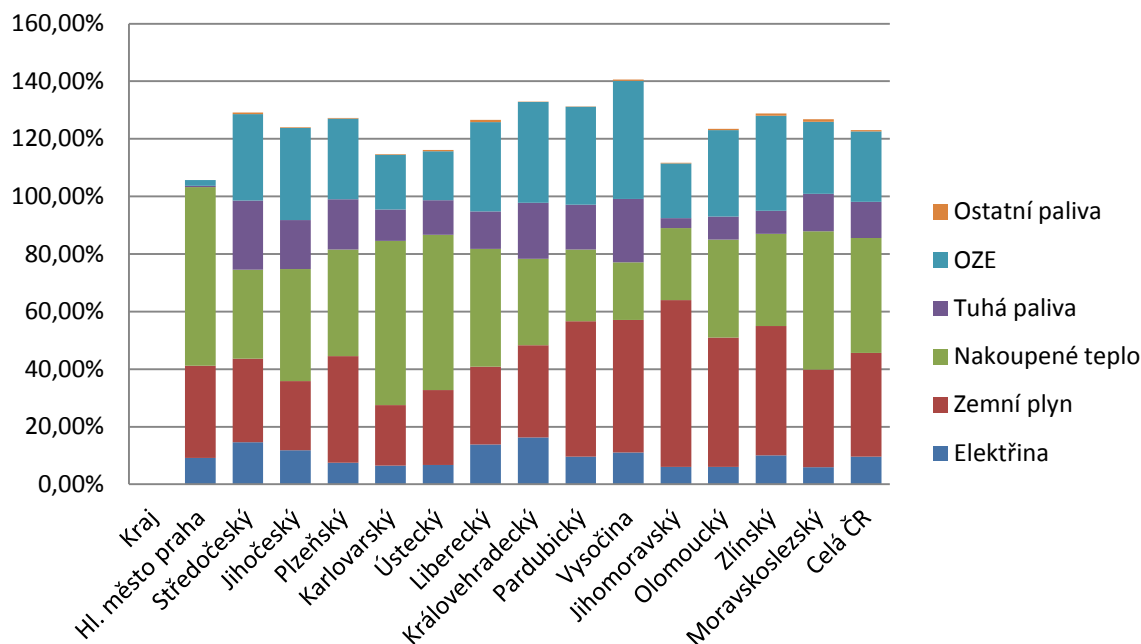
Mezi tyto znečišťující látky patří CO, NO₂, O₃, SO₂, TZL (PM₁₀), olovo. Je snahou omezovat vznik této skupiny škodlivých látek. Pro tento účel vznikají různé normy, které obsahují emisní limity těchto škodlivin. Emisní limity udávají maximální možnou koncentraci dané látky ve spalínách v okamžiku, kdy opouštějí spalovací zařízení.

Hlavní sledovanou veličinou je CO, ten je součástí všech norem. Každá země má své normy, ve kterých je uvedeno zastoupení ostatních kritériálních polutantů. Normy se mohou dále lišit v tom, jak přísné emisní limity je třeba splňovat pro sledovanou škodlivou látku.

5.4 Emise kotlů na tuhá paliva malých výkonů

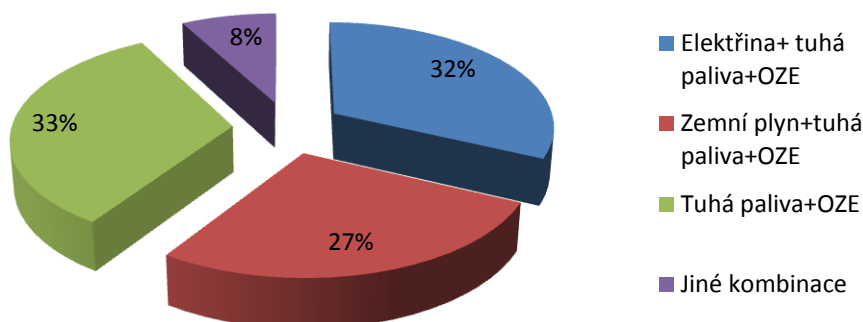
Dlouhodobé měření imisí v oblastech, kde dochází k průmyslovému znečišťování ovzduší, ukazují, že i malá domácí topeniště, která se používají k vytápění nebo ohřevu vody, mají na znečištění v daných lokalitách poměrně velký vliv. Toto znečištění je nejvíce patrné v období topné sezóny, to znamená především během zimních měsíců. Z toho vyplývá, že je nutné věnovat se zlepšování parametrů malých spalovacích zařízení a omezovat tak vznik znečišťujících látek, které v nich vznikají. Velký vliv na vznikající znečišťující látky má použité palivo [18].

V České republice je podíl používaných paliv k vytápění následující:



Graf 5.1: Podíl využití paliv na vytápění v domácnostech v ČR v roce 2015 [19]

Z grafu je patrné že v mnoha domácnostech se využívá k vytápění více než jednoho druhu paliva. Nejčastější kombinace jsou:



Graf 5.2: Kombinace paliv při vytápění domácností [20]

V České republice je nejvíce používaným palivem zemní plyn, nebo jsou domácnosti zásobovány teplem z centrálních zdrojů (teplárny, elektrárny). Z ekonomických důvodů je však stále velké množství domácností, ve kterých se vytápí tuhými palivy.

Pokud se zaměříme jen na vytápění tuhými palivy, tak kotle na tuhá paliva používá v České republice přes 500 000 domácností. Tyto kotle slouží nejčastěji ke spalování různých druhů uhlí nebo biomasy.

Z uhelných paliv se nejčastěji spaluje třízené hnědé uhlí (asi 90 % domácností), hnědé uhlí musí být kvalitnější než pro použití v elektrárnách a mělo by mít výhřevnost minimálně 12 MJ/kg, jinak by v domácích spalovacích zařízeních vůbec nehořelo, dále se spaluje třízené černé uhlí (5 %) a koks (5 %).

Jako biomasu spalujeme dřevo, slámu nebo to mohou být pelety a brikety vyráběné z dřevního odpadu a jiného rostlinného materiálu.

Obecně by se měly spalovat co nejkvalitnější paliva, tím je možné omezovat vznik znečišťujících látek, a v žádném případě by nemělo docházet ke spalování komunálního nebo průmyslového odpadu, při němž by vznikaly ty nejnebezpečnější látky [18].

5.5 Emisní limity a normy

Všechna spalovací zařízení určená k vytápění nebo ohřevu vody se musí před uvedením do prodeje certifikovat v autorizované zkušebně k tomu určené. Spalovací zařízení musí splnit bezpečnostní, technické a tepelné parametry a také limity produkovaných znečišťujících látek. Tyto zkoušky se provádí na základě příslušných norem:

- ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – terminologie, požadavky a zkoušení
- ČSN EN 12815: Varné spotřebiče pro domácnost na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody (sporáky)
- ČSN EN 13240: Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody (krbová kamna)
- ČSN EN 13229: Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody (krbové vložky)

Aby bylo možné porovnávat produkované emise z různých typů kotlů a od různých výrobců, normy udávají přesné postupy měření, umístění odběrových sond do spalínovodu a rozměry měřicího úseku. Naměřené hodnoty je poté nutné přepočítat na referenční koncentraci kyslíku (10 % O₂) [18].

5.5.1 Emisní třídy kotlů

Norma ČSN EN 303-5 udává současné limity pro teplovodní kotle v ČR, všechny kotle jsou rozděleny do emisních tříd, pro každou třídu jsou stanoveny emisní limity pro oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (OGC – celkový organický uhlík) a prach (TZL).

Emisní třídy jsou označovány čísly 1, 2, 3, 4, 5, kde třída 5 má nejpřísnější limity.

Emisní třída 1 - do této třídy můžeme zařadit prohořivací kotle, ve kterých můžeme spálit prakticky všechno (hnědé uhlí, černé uhlí, koks, dřevo), ale kvalitní spalování probíhá pouze při spalování drahých paliv černého uhlí a koksu.

Emisní třída 2 - do této třídy řadíme kotle odhořivací, slouží pro spalování paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny (hnědé uhlí, dřevo, štěpka).

Kotle 1. a 2. emisní třídy se podle zákona nesmí prodávat od 1. 1. 2014 a jejich provozování je povoleno jen do 1. 9. 2022.

Emisní třída 3 - tuto emisní třídu splňují kotle, které jsou přestavěné z prohořivacích na automatické, některé typy odhořivacích kotlů nebo automatické kotle na uhlí.

Kotle 3. emisní třídy se mohou prodávat do 1. 1. 2018, konec provozování zatím není určen.

Emisní třídy 4 a 5 - do těchto tříd je možné zařadit nejmodernější typy kotlů, zejména zplyňovací kotle na dřevo a automatické kotle na dřevní pelety (případně na uhlí).

Ani s kotli 4. a 5. třídy omezení nekončí, jejich prodej bude ukončen 1. 1. 2020 a dále bude možné legálně zakoupit pouze kotle, které budou splňovat požadavky ECODESIGN. Jedná se o kotle 5. třídy rozšířené o požadavky ECODESIGN

Od 1. 1. 2017 jsou majitelé spalovacích zařízení povinni na vyžádání předložit protokol o revizi kotle včetně označení emisní třídy kotle [18].

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			CO				
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Tab. 5.1: Emisní limity CO dle ČSN EN 303-5 [22]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			OGC				
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)		
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)		
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Tab. 5.2: Emisní limity OGC dle ČSN EN 303-5 [22]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			Prach (TZL)				
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ^{2),3)}	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		

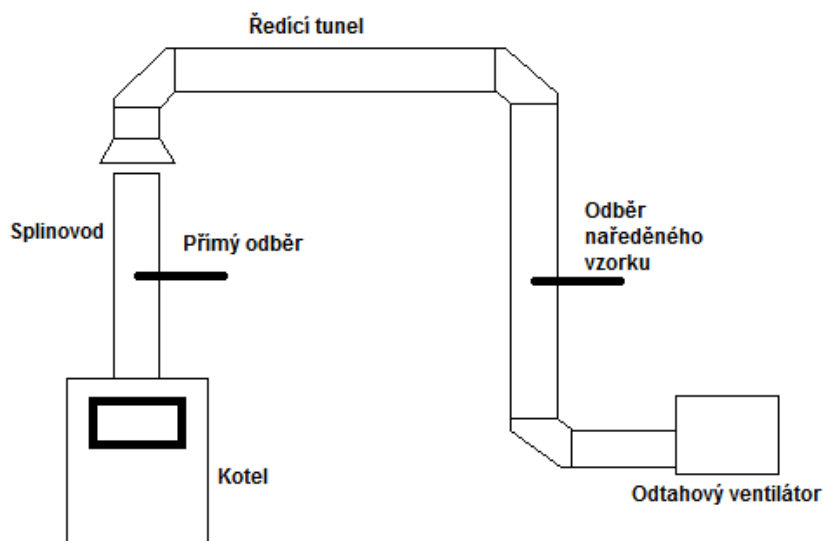
¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999²⁾ dle nové EN 303-5:2012³⁾ U kotlů emisní třídy 3 pro alternativní biopaliva není třeba splnit požadavek na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³ N při 10% O₂ (145 mg/m³ N při 13% O₂).

Tab. 5.3: Emisní limity TZL dle ČSN EN 303-5 [22]

5.6 Způsoby měření emisí TZL

Měření TZL ve spalínách je proces, který se skládá z dílčích procesů, které je nutné vhodně realizovat tak, aby bylo měření správné.

Nejprve je potřeba zvolit správný měřicí profil, tj. vhodné místo odběru spalín. Může se měřit hned za výstupem ze spalovacího zařízení, ale je zde nevýhoda z důvodu nízké rychlosti proudění a vysoké koncentrace znečišťujících látek. Tento způsob měření se nazývá přímý odběr spalín z měřicího profilu. Existuje ještě jedna možnost, a to odběr naředeného vzorku spalín z ředícího tunelu. V tomto případě je za výstup z kotle umístěn ředící tunel, kde se spaliny odebírají. Ředící tunel má na vstupu digestoř, kde se nasávají jak spaliny ze spalovacího zařízení, tak okolní vzduch, tím dojde k naředění koncentrace, zvýšení rychlosti proudění a snížení teploty rosného bodu. Tah v ředícím tunelu je zjišťován pomocí odtahového ventilátoru [22].



Obr 5.1: Způsoby odběru vzorku spalin [18]

Jakmile je vhodně zvoleno odběrové místo, následuje další fáze, a to odběr vzorku, následně je nutné vzorek upravit tak, aby bylo možné ho analyzovat, a poslední fáze je samotná analýza vzorku spalin [22].

5.7 Druhy analyzátorů plyných škodlivin

5.7.1 Ruční přenosné analyzátory spalin

Slouží především k rychlému stanovení koncentrací základních škodlivin (CO , CO_2 , NO , SO_2 , O_2) ve spalinách. Princip je založen na elektrochemických převodnících. Nevýhodou je absence filtru na TZL, to způsobuje zanášení přístroje a je nutné jej jednou ročně nakalibrovat. Naopak výhodou je mobilita, jednoduchá obsluha, velmi rychlé zhodnocení výsledků a poměrně nízká cena [22].

5.7.2 Stacionární analyzátory spalin

Mají využití při kontrolování větších zdrojů znečištění (elektrárny) a na zkušebnách kotlů. Analýza a úprava vzorků je kvalitnější, zařízení má kvalitní filtry. Měření škodlivin (CO , CO_2 , NO , SO_2) se provádí na základě absorpce infračerveného záření ze vzorku. Kyslík ve spalinách se určuje paramagnetickým způsobem (kyslík jako jediný z technicky důležitých plynů je paramagnetický, mění se rychlost průtoku plynu na základě ohřívání plynu a působení magnetického pole). Výhodou těchto přístrojů je možnost přidání dalších částí pro měření jiných látek a možnost kalibrace pomocí etalonových plynů. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena [22].

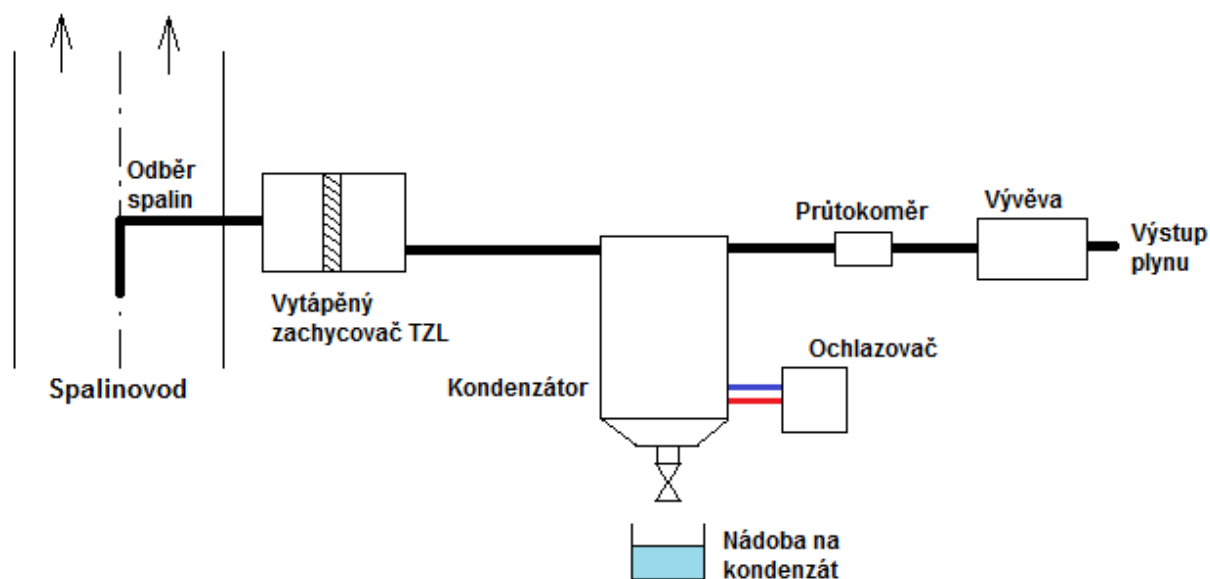
5.8 Metody a přístroje pro analýzu TZL ve spalínách

5.8.1 Gravimetrická metoda

Jde o základní metodu, pomocí níž se stanovují referenční hodnoty koncentrace TZL v uzavřeném profilu, a dále se používá ke kontrole automatických měřicích zařízení. Metoda vychází z normy ČSN ISO 9096 (hmotnostní koncentrace 5 až 10 mg/m³, Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda) a z normy ČSN EN 13284-1 (do 50 mg/m³, Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu – Manuální gravimetrická metoda), po přepočítání na normální stavové podmínky.

Odběrová trubice je zavedena do komína a odebírané spaliny prochází přes vyhřívaný zachycovač, v něm se částice TZL zachytávají na filtru. Spaliny, které projdou přes filtr, a dále putují do chladiče, kde zkondenzují vodní páry, za kondenzátorem je umístěný průtokoměr, kterým se měří množství spalin a na konci měřicí trati je vývěva, která zajišťuje žádaný podtlak a tím odběr spalin. Výstupem z měření touto metodou je hmotnostní koncentrace TZL, která je vypočítaná z hmotnosti částic zachycených na filtru a z množství odebraných spalin.

Jedná se o poměrně složitou aparaturu, ale dosahuje poměrně spolehlivých výsledků [18,22].



Obr. 5.2. Schéma měřicí trati pro gravimetrickou metodu [18]

5.8.2 Přenosná aparatura Wohler SM 96

Toto zařízení pracuje na stejné metodě měření, tzn. gravimetrické metodě. Na rozdíl od předchozí metody se jedná o kompaktní zařízení, které je přenosné a jednoduše ovladatelné. Jelikož se vše muselo zmenšit tak, aby bylo dosaženo optimální velikosti, je možné měřit jen nižší koncentrace TZL ve spalínách (do 200 mg/m³). Zařízení je používáno zejména v Rakousku a v Německu, a tudíž splňuje tamní normy. Je možné s ním pracovat ve zkušebnách, ale umožňuje kontrolu již nainstalovaných spalovacích zařízení.

5.8.3 Měřicí systém SMPS

Měřicí systém SMPS se skládá ze dvou zařízení, jedním je zařízení pro velikostní rozdělení procházejících částic na základě jejich hybnosti a druhým zařízením je CPC (Condensation particle counter), který počítá procházející částice o dané velikosti. Celý systém je propojený s programem v počítači, kde se vyhodnocují výsledky měření. Tento systém dokáže zachytit částice o velikosti 10 až 1000 nm.

Tento systém je použitý při měření v rámci této diplomové práce, podrobnější popis následuje v kapitole Návrh měřicího stendu.

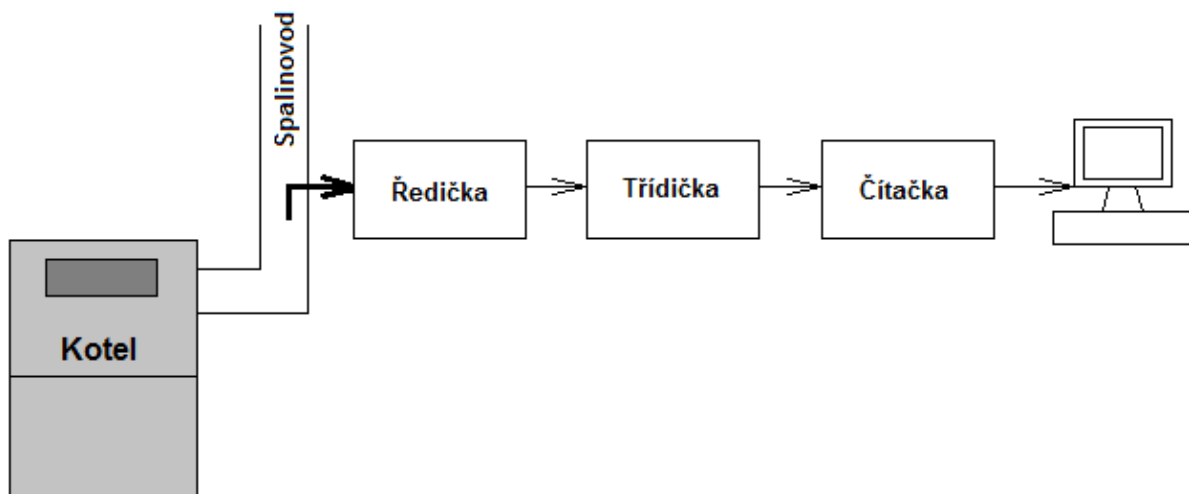
5.8.4 Ostatní metody měření TZL

Výše zmíněné zařízení slouží především pro měření koncentrace TZL ve spalínách u malých spalovacích zařízení. Další přístroje slouží pro měření u větších zdrojů znečištění:

- **optické prachoměry** – pracují na principu rozptylu světelného paprsku. Paprsek jde ze zdroje (laser, dioda) a snímač zachycuje paprsky odražené od částic. Prachoměry pracují v rozsahu koncentrací 0,1 až 1000 mg/m³
- **elektroodlučovače** – zachycují TZL z proudu spalín pomocí elektrostatických sil. Odloučené částice se pak váží a výsledkem měření je hmotnostní koncentrace částic TZL.

6 NÁVRH MĚŘICÍHO STENDU PRO MĚŘENÍ JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH

Měřicí okruh se skládá z několika na sebe navazujících zařízení. Jako zdroj emisí je použitý automatický kotel na biomasu. Do spalínovodu je zavedena odběrová sonda ředicího zařízení na ředění spalin. Na tuto ředičku dále navazuje třídící zařízení, které slouží k oddělování požadované velikosti částic. Poslední zařízení je čítačka částic, která je propojena s počítačem kam odesílá naměřená data, ta jsou zpracovávána příslušným softwarem. Použitá zařízení jsou dále popsána.



Obr. 6.1: Schéma měřicího stendu

6.1 Automatický kotel na biomasu VERNER A251

Automatický teplovodní kotel slouží jako komfortní, ekonomický a ekologický zdroj tepla pro vytápění a ohřev vody v rodinných domech, dílnách, zemědělských budovách a podobných objektech. Umožňuje spalování nejrozličnějších druhů biomasy:

- obilí (pšenice, ječmen, kukuřice, ...)
- dřevní pelety (průměr 6-14 mm)
- alternativní pelety (z energetických rostlin, obilné slámy, ...; průměr 6-14 mm)

Kotel umožňuje plně automatický provoz, násypka zajišťuje zásobu paliva až na několik dní, palivo je dopravováno do spalovací komory šnekovým dopravníkem. Ve spalovací komoře dochází k automatickému zapálení paliva pomocí zapalovací tyče a elektrického horkovzdušného systému. Účinnější spalování paliva zajišťuje rozptylovač, který palivo rovnoměrně rozvrství po roštu. Palivo se spaluje v hořáku, nespalitelné zbytky paliva jsou vytlačovány roštníky do popelníku. Kotel lze doplnit o automatické odpopelňovací zařízení, v tom případě kotel nemá popelník, ale žlab a z něho je popel pomocí šnekového dopravníku dopravován do popelnice.

Potřebný spalovací vzduch je do spalovací komory vháněn pomocí přetlakového ventilátoru. Spalovací vzduch je rozdělen na primární, ten vstupuje do procesu hoření skrze rošt, a na sekundární, který proudí skrz otvory v zadní stěně hořáku.

Spaliny předají teplo topné vodě a po zchlazení odchází do komína [23].

Jmenovitý výkon	25 kW
Regulovatelnost kontinuálním provozem	7,5 – 28 kW
Regulovatelnost elektronicky řízeným odstávkovým režimem	0 – 7,5 kW
Účinnost	92 %
Spotřeba paliva (jmenovitý výkon)	
obilí (pšenice, ječmen, kukuřice, ...) 14,5 MJ/kg	6,8 kg/h
dřevní pelety 17,5 MJ/kg	5,8 kg/h
rostlinné pelety 15,5 MJ/kg	6,3 kg/h
Objem vodní náplně	85 l
Objem násypky	240 l
Teplota spalín při jmenovitém výkonu	160 °C
Pracovní rozsah výstupní teploty	65 – 90 °C
Minimální teplota vratné vody	60 °C
Maximální konstrukční přetlak	3 bary (0,3MPa)
Připojovací trubky	G5/4"
Celková hmotnost	575 kg
Předepsaný provozní tah komína	15 Pa
Přívodní napětí	230 V / 50 Hz
Maximální elektrický příkon (při zapalování)	1500 W
Průměrný příkon při provozu	100 W
Krytí elektrických součástí	IP41
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3
Doba hoření jedné násypky (při jm. výkonu)	27 hod
Hmotnostní tok spalín (při jm. výkonu)	0,016 kg/s
Prostředí (dle ČSN 332000-3)	základní AA5/AB5
Hmotnost přídatného odpopelňovacího zařízení	55 kg
Objem popelnice (odpopel. zařízení)	45 l

Tab. 6.1: Parametry kotle VERNER A251 [23]

Kotel je řízený pomocí inteligentní elektronické regulace, ta dodává do hořáku přesné množství paliva a spalovacího vzduchu.

Vstupy do regulace:

- **základní** – teplota výstupní vody, teplota spalín, signál z bezpečnostního spínače víka násypky, signál z koncového spínače roštového mechanismu
- **doplňkové** – signál z pokojového termostatu, teplota vody z boileru, signál pro externí zapínání a vypínání kotle [23]

Výstupy z regulace

- **základní** – elektromotor plnicího dopravníku, ventilátor spalovacího vzduchu, elektrická zapalovací tyč, čerpadlo topné soustavy, čerpadlo kotlového okruhu
- **doplňkové** – elektromotor popelového dopravníku, řídicí jednotka přídatného dopelňovacího zařízení paliva, spínací kontakt externí signalizace poruchy [23]

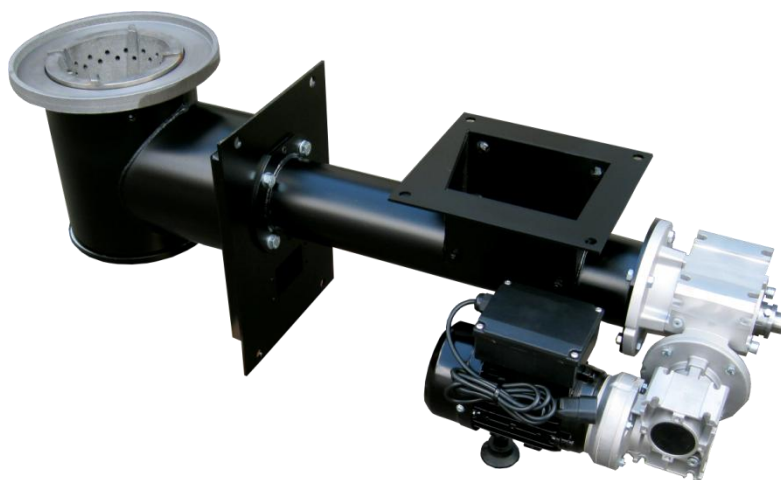


Obr. 6.2: Automatický kotel VERNER A251 [23]

6.2 Automatický kotel Ekoscroll V7 Economic

Automatický kotel s retortovým hořákem, používá se zejména k vytápění v obytných budovách, veřejných budovách, továrnách, ... Jako palivo se používá hnědé uhlí ořech 2 (granulace 5-25 mm), v současné době probíhá zkoušení a měření kotle za účelem využití pro spalování dřevních pelet.

Součástí kotle je zásobník paliva, který má objem 240 l. Při provozu kotle na jmenovitém výkonu a při plném zásobníku máme zásobu paliva na provoz kotle 42 hod. Palivo ze zásobníku je do hořáku dopravováno pomocí šnekového podavače [24].



Obr. 6.3: Hořák s otočnou retortou [25]

Kotel je vybaven litinovým hořákem s otočnou retortou, to umožňuje i spalování méně kvalitního uhlí s vyšším obsahem prachu a také dřevní pelety, palivo je šnekovým podavačem tlačeno do kolena a do hořáku, tím se drtí a dostává se do prostoru hoření. Popel odpadáva přes límec pod hořák, kde je umístěn popelník. Otáčení retorty umožňuje odstranění spečeného paliva. Vzduch proudí do hořáku rovnoměrně ze všech stran směrem ke středu.

Zapálení kotle neprobíhá automaticky, ale je nutné přepnout ovládání do ručního režimu a naplnit hořák asi do 2/3. Na palivo v hořáku je poté třeba umístit podpalovač a dřevo. Po zapálení se zapíná vzduchový ventilátor a po dohoření dřeva, začíná hořet i palivo v hořáku, které bylo do kotle dopraveno podavačem. Dále je nutné ručně ovládat podavač a tím doplňovat palivo po horní okraj hořáku, to se dělá do té doby, než dosáhne teplota vody 60 °C. Poté je možné přepnout řídicí jednotku kotle do automatického režimu. Kdyby došlo k vyhasnutí kotle během zapalování, je třeba vyčistit hořák a celý proces opakovat od začátku.

Spaliny předávají teplo do topné vody ve výměníku, který je svařovaný z ocelových plechů, po předání tepla odchází do spalínovodu.

Kotel je obalen izolací z minerální vlny a plechovým pláštěm [24].

Jmenovitý výkon	25 kW
Rozsah tepelného výkonu	7,5-25 kW
Provozní komínový tah	12-15 Pa
Objem vody ve výměníku	70 l
Rozsah regulace teploty	55-85 °C
Minimální teplota vratné vody	55 °C
Maximální příkon (řídicí jednotka, ventilátor elektromotor)	110 W
Pracovní přetlak	2 bar
Tlaková zkouška	4 bar
Kapacita zásobníku paliva	260 l
Maximální teplota	85 °C
Hydraulická ztráta kotle	$\Delta T=10$ 3,6
	$\Delta T=20$ 1,8
Hlučnost	< 51,4 ± 3,2 dB
Hmotnostní průtok spalín	0,013/0,004 kg/s
Doba hoření při jmenovitém výkonu (plný zásobník paliva)	42 hod
Třída kotle dle ČSN EN 303-5	4
Druh paliva	Hnědé uhlí ořech 2 (dřevní pelety)
Napájecí napětí	230 V / 50 Hz

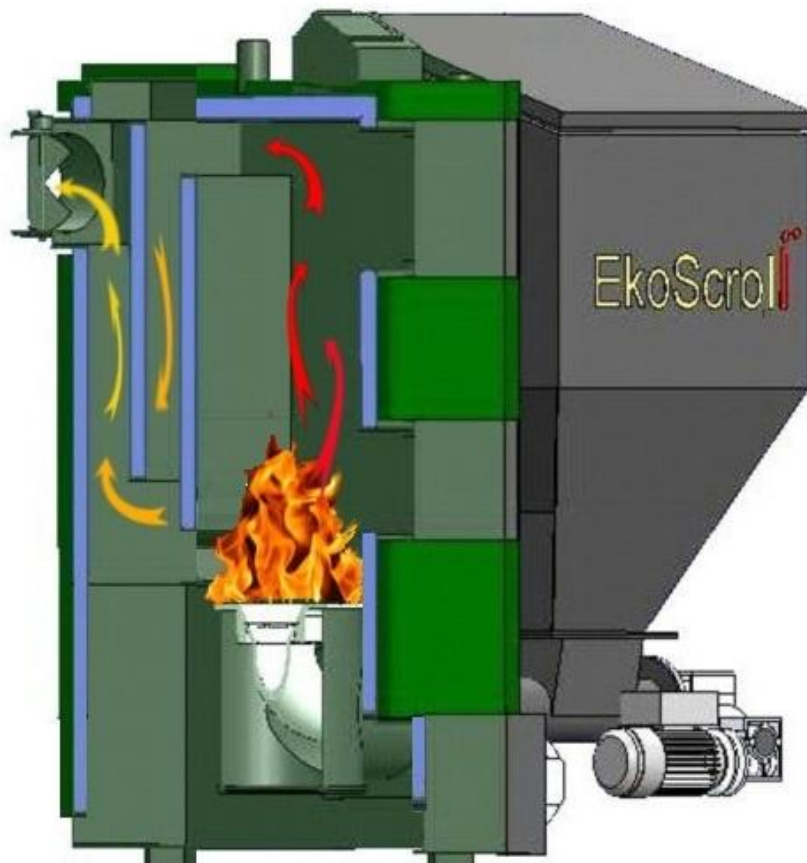
Tab. 6.2: Parametry kotle Ekoscroll Economic [24]

K ovládání kotle slouží řídicí jednotka EcoMax 250R. Slouží k řízení práce šnekového podavače paliva, vzduchového ventilátoru čerpadla topné vody a čerpadla teplé užitkové vody (TUV).

Řídicí jednotka je v provozu do okamžiku, kdy je dosažena požadovaná teplota v kotli. Kotel je přepnut do udržovací fáze, vypíná se podavač a ventilátor a čerpadla pracují podle nastavených parametrů. Jakmile dojde ke snížení teploty v kotli, je opět přepnut do fáze automatické práce [24].

Kotel je vybavený bezpečnostními prvky:

- havarijní čidlo – brání přetopení kotle
- čidlo teploty podavače paliva – brání prohoření paliva do násypky
- tavná pojistka – druhá pojistka proti prohoření paliva
- střížný šroubek – chrání převodovku podavače před přetížením [24]



Obr. 6.4: Automatický kotel Ekoscroll V7 Economic [26]

6.3 Ředicí zařízení – Rotating Disc Thermodiluter 379020A

Jedná se o zařízení od firmy TSI. Ředička slouží k naředění proudu částic, které jsou odebírané ze zdroje částic, skládá se ze dvou částí, ředicí hlavy a řídicí jednotky, které jsou propojeny hadicemi. V jedné jsou trubičky, kterými prochází proud částice, a ve druhé jsou ovládací vodiče [27].



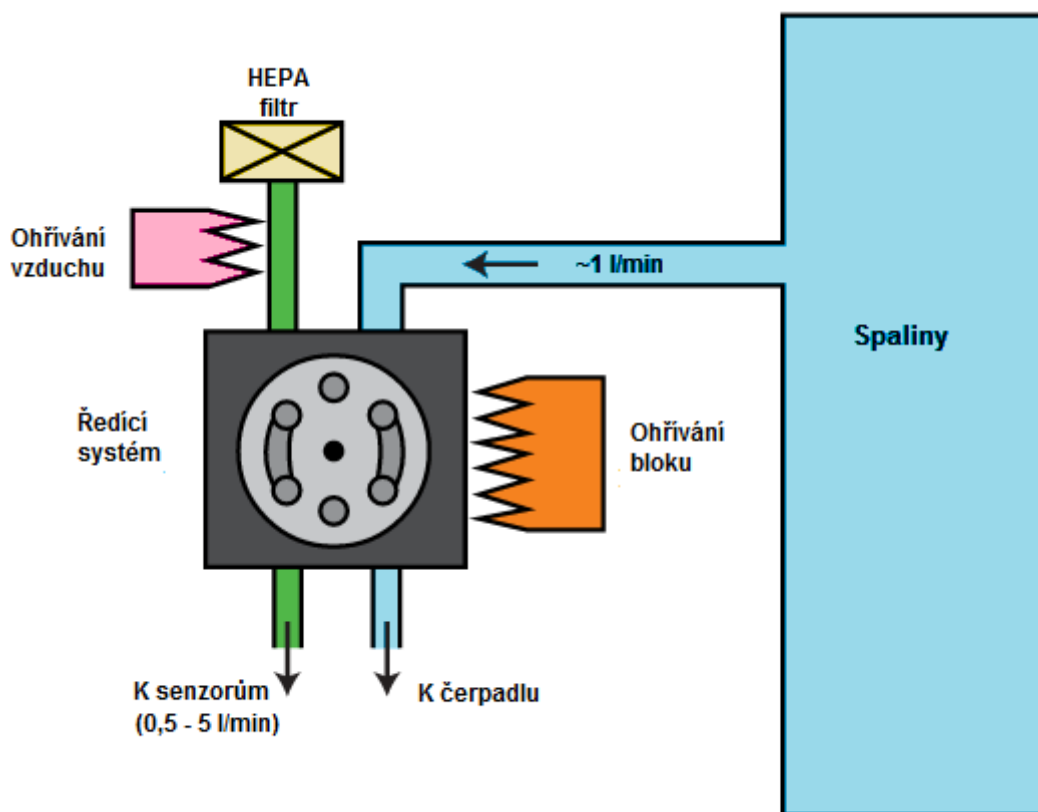
Obr. 6.5: Ředicí zařízení [27]

Ředicí hlava bývá umístěna přímo u zdroje částic, do kterého je zavedena sonda (odběrová trubička). Odebraný vzorek plynu je ředěn pomocí rotujícího disku, který může mít buď 8, nebo 10 dutin, a ředicí poměr může být od 15:1 do 3000:1, volba disku závisí na požadovaném ředicím poměru:

- 10 dutin 15:1 až 300:1
- 8 dutin 150:1 až 3000:1

Ředicí poměr na jednom disku je poté volen rychlostí otáčení disku. Plyn, který je zachycen v dutince, jde dále do měřicího kanálu, odkud pokračuje do třídícího zařízení. Zbytek plynu odchází ze zařízení výfukem pryč. Objem odebíraného plynu na vstupu do sondy by měl být 2 l/min [27].

Řídicí jednotka slouží k ovládání celého zařízení, Veškeré ovládací prvky jsou na předním panelu zařízení. Je zde ovládání ředicího poměru pomocí otočného ovládacího prvku, má 10 úrovní a každá úroveň je rozdělena na 100 dílků. Dále je možné zapnout vyhřívání hadiček, a tím zabránit kondenzaci plynu v hadičkách, vyhřívání je možné zapnout na čtyři úrovně 80, 120 nebo 150 °C nebo bez vyhřívání. Zařízení se může provozovat se zapnutým čerpadlem nebo vypnutým pomocným čerpadlem, díky kterému dochází k intenzivnějšímu odběru vzorků. Součástí ovládacího panelu je několik signalizačních diod [27].



Obr. 6.6: Schéma ředicího zařízení [27]

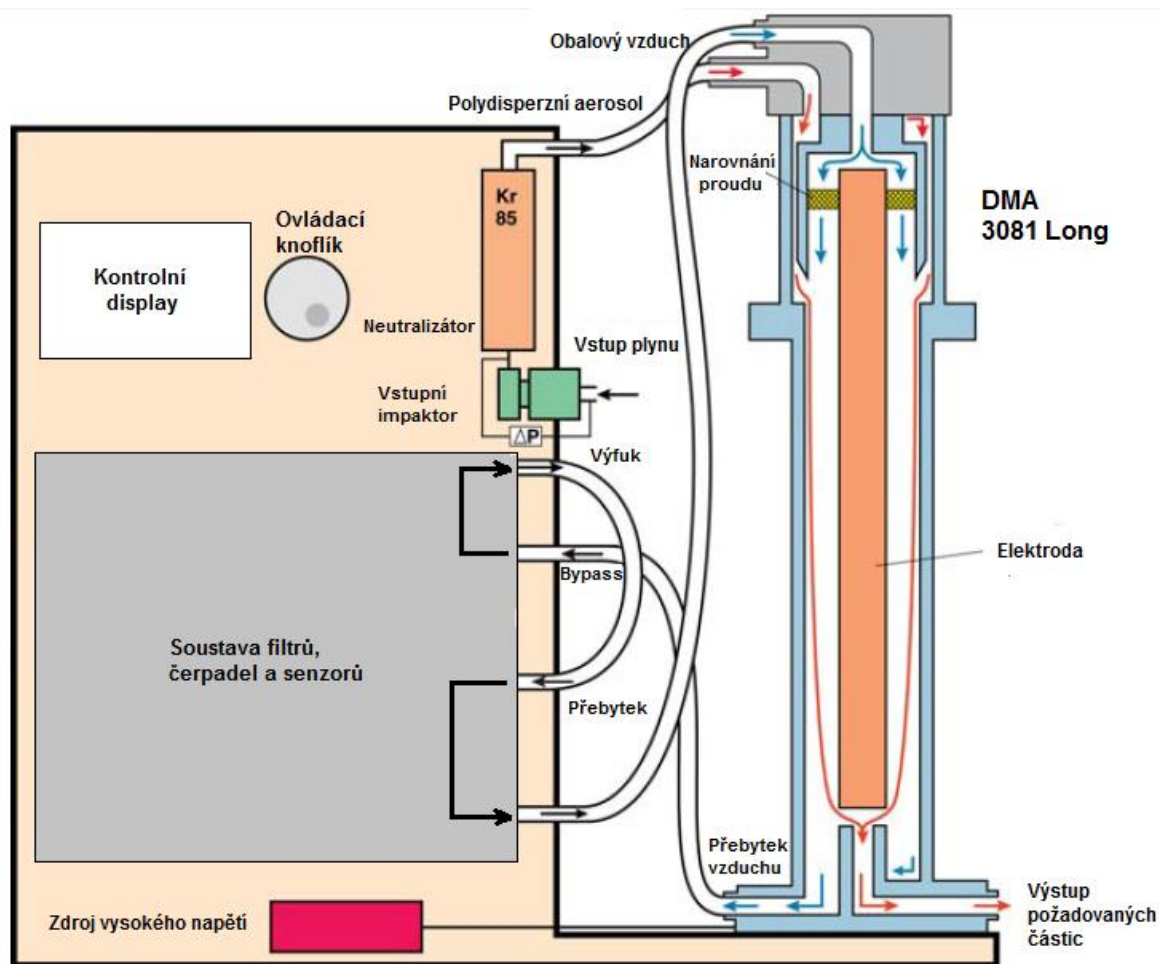
6.4 Třídící zařízení – Electrostatic Classifier 3080

Zařízení od firmy TSI. Toto třídící zařízení slouží k oddělování požadované velikosti částic z proudu plynu, který obsahuje částice všech velikostí (polydisperzní aerosol). Zařízení se skládá z několika hlavních částí:

- řídicí jednotka
- neutralizační komora
- DMA (Differential mobility analyzer)

Zařízení se ovládá jedním knoflíkem, umístěným na řídicí jednotce na kontrolním panelu, vedle je displej, na kterém jsou zobrazeny měřené a volené veličiny:

- napětí v DMA
- průměr částic
- rychlost proudu nosného vzduchu
- rychlost proudu vzorku plynu [28]



Obr. 6.7: Schéma třídícího zařízení [28]

Na vstupu do zařízení je umístěný vstupní impaktor, který odloučí příliš velké částice na základě jejich setrvačnosti. Zatímco menší částice zatočí a vstoupí do třídící, větší pokračují rovně a zůstanou zachyceny na ploše, která je natřena vazelínou.

Protože částice na sobě nesou různý náboj, je třeba tento náboj neutralizovat. K tomuto účelu nám slouží neutralizační komora, v tomto případě se k neutralizaci částic používá přídavné zařízení Advanced Aerosol Neutralizer 3087 [28].

Advanced Aerosol Neutralizer 3087 – tento bipolární neutralizátor nám zajišťuje neutralizaci náboje na procházejících částicích. Na nabitě částice se navážou opačně nabitě ionty. K neutralizaci dochází pomocí rentgenových paprsků o energii 9,5 keV. Jako zdroj rentgenových paprsků je použitý ^{85}Kr , zdroj jde jednoduše vypnout, proto je zařízení vhodné pro mobilní měření. Neutralizované částice putují do DMA, v tomto případě DMA 3081 Long.

DMA 3081 Long – jedná se o zařízení (trubici), které dokáže vytřídit určitou velikost částic, pomocí elektrického pole. Model 3081 Long dokáže třídit částice od 10 do 1000 nm. Zařízení je tvořeno dvěma elektrodami, které jsou od sebe izolovány. Tyto elektrody vytvářejí elektrické pole, jehož velikost můžeme měnit nastavováním napětí na elektrodě.

Princip třídění je založen na elektrostatické síle, kterou jsou částice, které jsou unášeny proudem vzduchu, přitahovány ke středové elektrodě. Na začátku zařízení se vzorek aerosolu smísí s nosným vzduchem, který udává částicím požadovanou rychlost. Na konci trubice je uprostřed otvor, kterým jsou odváděny částice požadované velikosti k dalšímu měření. Přebytečný vzduch projde přes soustavu filtrů, čerpadel a snímačů a po vyčištění se používá jako nosný vzduch.

Otvor pro odvod částic je velice malý a projdou jím jen ty částice, které dopadají na středovou elektrodu přímo v tomto místě. O tom, jaké částice vytřídíme, rozhoduje rychlost nosného vzduchu a napětí na elektrodě. Každé velikosti odpovídá určité napětí.

Výstup z třídičky je napojen na čítecí zařízení [28].



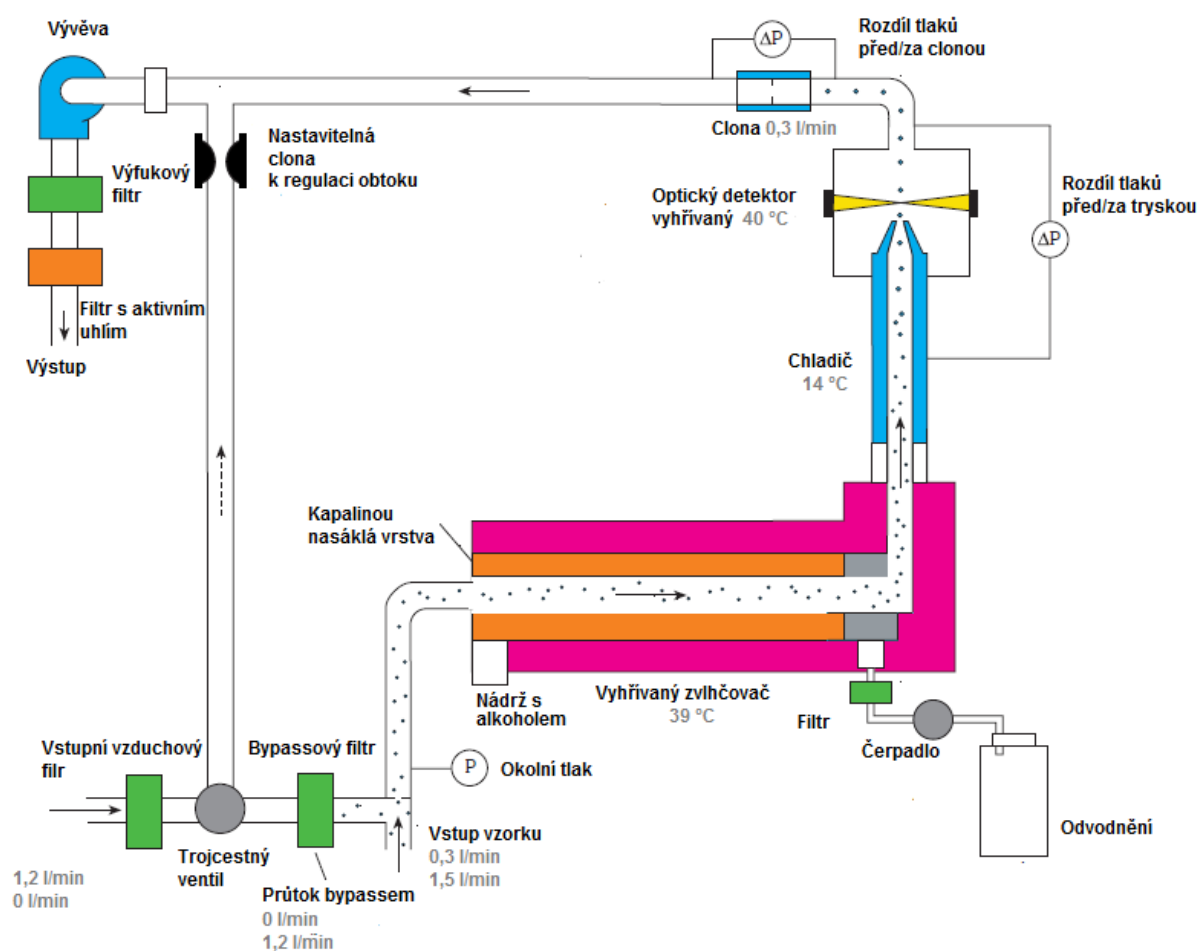
Obr. 6.8: Electrostatic classifier 3080 [28]

6.5 Sčítací zařízení – Condensation Particle Counter (CPC) 3775

Sčítací zařízení je taktéž výrobkem firmy TSI a jde o zařízení, které spočítá jemné částice v proudu plynu. Samotné zařízení nedokáže rozpoznat velikost částic, to za něj dělá právě předřazené třídící zařízení. Zde dochází pouze k počítání.

Zařízení dokáže spolehlivě sčítat částice od velikosti 4 nm, a to v rozsahu měření 0 až 10^7 částic/cm³ (N/cm³).

Zařízení má ovládací panel, na kterém je jeden ovládací knoflík, displej a dioda, která signalizuje průchod částic (blikne při zaznamenání průchodu částice nebo svítí, pokud prochází více než 10 částic za sekundu). Na displeji je možné sledovat aktuální koncentraci částic, a to od okamžiku, kdy dojde k zahřátí příslušných součástí (zvlhčovač, chladič, optické čítací zařízení). Pokud není zařízení připojeno k počítači, je možné data ukládat na paměťovou kartu [29].



Obr. 6.9: Schéma čítacího zařízení [29]

Proud plynu, ve kterém jsou pouze vytřízené částice o požadované velikosti (monodisperzní aerosol) nám přichází ze třídičky a vstupuje do zařízení. Je možné nastavit dvě hodnoty průtoku, které zajišťuje trojcestný ventil, a to nízký (low) 0,3 l/min, nebo vysoký (high) 1,5 l/min. Vývěva, která je umístěna před výstupem ze zařízení, pořád udává průtok 1,5 l/min, to znamená, že pokud je nastavený nízký průtok (0,3 l/min), musí si zařízení přisávat 1,2 l/min vzduchu. Přisávaný vzduch vstupuje přes HEPA filtr, neprochází však přes měřicí zařízení, ale obtokem jde rovnou k výstupu. Když je však nastavený vysoký průtok (1,5 l/min), musí být

trojcestný ventil otevřený tak, aby přebytečný aerosol (1,2 l/min) procházel bypassem přes bypassový filtr rovnou k výstupu. Důvodem je, že přes měřicí část zařízení je nastavený průtok 0,3 l/min tento průtok zajišťuje clona, která je umístěná za měřicí částí zařízení.

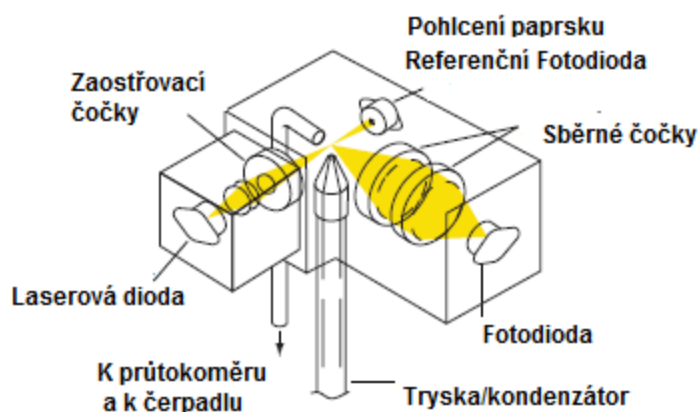
Monodisperzní aerosol, který se přímo účastní měření, je veden k měřicímu zařízení. Nejdříve však musí projít přes zvlhčovač [29].

Zvlhčovač (saturátor) – jako zvlhčovací médium slouží alkohol, v našem případě butanol, který je umístěn v nádrži mimo zařízení, odkud je zaveden do válcového knotu, který je jím nasáklý, a je umístěn ve zvlhčovači. Jelikož je zvlhčovač vyhříván na teplotu 39 °C, dochází k jeho odpařování do proudu aerosolu.

Aerosol je od této chvíle tvořen velmi jemnými částicemi a parou alkoholu. Následuje podchlazení aerosolu ve vertikálním chladiči (kondenzátoru) na 14 °C, což způsobí, že páry butanolu začnou kondenzovat. A jelikož jsou zde přítomné jemné částičky, které se chovají jako iniciátory kondenzace, začnou se na nich tvořit drobné kapičky. Tím dochází ke zvětšení objemu částic, které je tak možno lépe zachytit a spočítat. Chladič je na konci zakončen tryskou, která ústí do prostoru optického sčítacího zařízení. Kapičky butanolu, které nezkondenzují na částicích, ale na stěnách trubky kondenzátoru, stékají po stěnách dolů, odkud jsou odvedeny odvodňovacím systémem.

Optická sčítací komora – optický detektor je vyhříván na 40 °C, čímž se předchází kondenzaci butanolu na čočkách nebo jiných částech detektoru.

Princip měření je založen na odrazu světla. Laserová dioda společně se zaostřovacími čočkami vytvoří horizontální laserový paprsek, který prochází přímo nad ústím trysky kondenzátoru. Při průchodu částic obalených kapičkami butanolu dochází k rozptýlení paprsku, a sběrné čočky sbírají paprsky odražené o úhel 90 °oproti původnímu paprsku, zaostří ho a paprsek je zaznamenán citlivým fotodetektozem (fotodioda), tento signál znamená procházející částici. Zbytek původního paprsku, který se neodrazí od procházejících částic, dopadá na zadní stěnu komory, kde je pohlcen. Referenční fotodioda slouží pouze k udržování stálé intenzity laserového paprsku [29].



Obr. 6.10: Optický detektor částic [29]

Poté co proud aerosolu opustí sčítací komoru, prochází přes clonu, která zajišťuje stále stejný průtok v měřicí části zařízení. Vývěvou je hnán na výstup, ale dříve než definitivně opustí zařízení, musí projít přes soustavu filtrů [29].

6.6 Vyhodnocovací program – Aerosol Instrument Manager Software

Software vydaný firmou TSI, slouží k vyhodnocování měření ultrajemných částic v proudu plynu. Software je nainstalovaný na počítači, který je propojený s čítacím zařízením CPC 3775. Program data získaná z měření zapisuje do tabulky a graficky znázorňuje průběh měření. Data je možné exportovat, a používat pro další aplikace, nebo je lze vytisknout, a používat taková jaká jsou, bez jakýchkoli dalších úprav.

Program zaznamenává kromě koncentrace částic [N/cm^3] také další hodnoty:

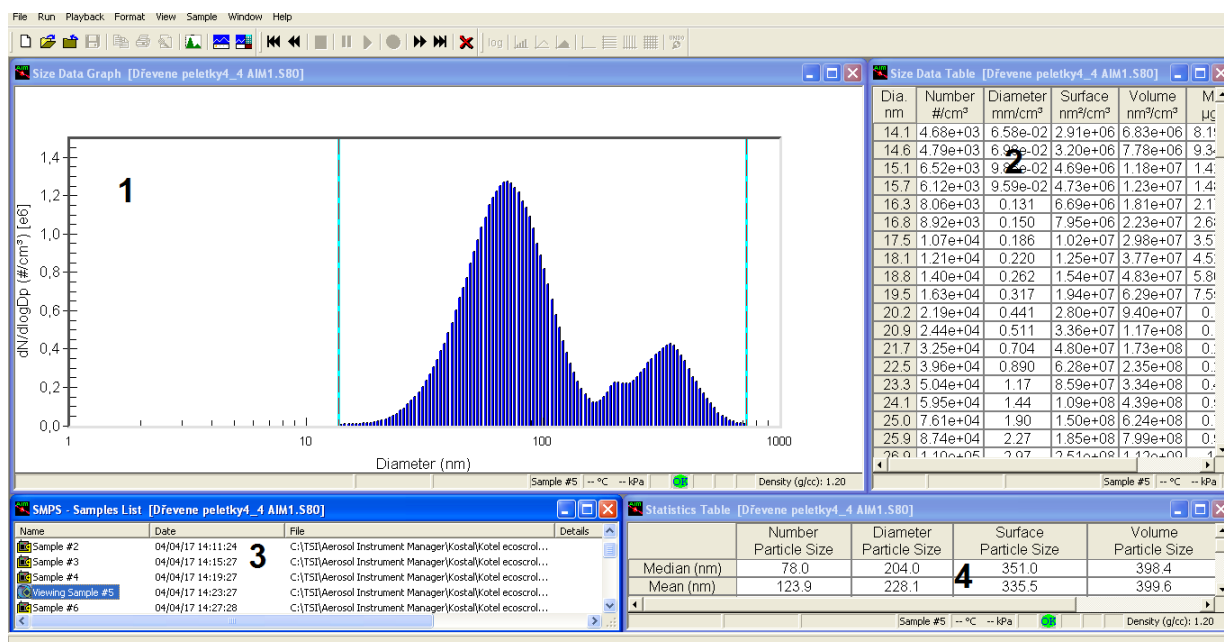
- průměr částic [nm/cm^3]
- povrch částic [nm^2/cm^3]
- objem částic [nm^3/cm^3]
- hmotnost částic [$\mu\text{g}/\text{cm}^3$]

Mimo to dokáže pro všechny veličiny určit statistické údaje:

- minimální hodnotu
- maximální hodnotu
- průměrnou hodnotu
- celkovou koncentraci

Pracovní plocha je rozdělena do čtyř částí:

- grafické znázornění průběhu měření
- tabulka naměřených hodnot
- seznam měřených vzorků
- statistické údaje



Obr. 6.11: Pracovní plocha AIM Software

Program umožňuje dva způsoby měření jemných částic, první způsob měření je měření jedné zvolené velikosti částic a zjišťování koncentrace v závislosti na čase. A druhý způsob měření umožňuje měření celého měřitelného spektra částic, výsledkem je koncentrace jemných částic v závislosti na průměru daných částic, toto

měření probíhá po dobu, kterou si nastavíme, lze nastavit jak délku jednoho měření, tak počet měření, která proběhnou automaticky po sobě.

Před začátkem měření je nutné zajistit propojení programu s přístroji a zadat parametry měření. Parametry se volí v dialogovém okně, které se zobrazí při zakládání nového souboru, nebo se do něj lze dostat přes tlačítko File, na horním panelu, kde se vybere položka Properties.

Volené parametry měření:

- CPC model a průtok – volba typu CPC a průtoku (low/high)
- Aerosol – volba průtoku přes měřicí zařízení se automaticky nastaví podle toho, jaký typ průtoku se vybere
- Sheatflow – volba hodnoty průtoku nosného vzduchu procházejícího přes DMA, hodnota by měla být desetinásobek hodnoty Aerosol a musí se ručně nastavit na třídícím přístroji.
- rozsah měření – automaticky se vyplní podle nastavených parametrů, po kliknutí na tlačítko „Set to max range“

Ostatní parametry zůstávají pořád stejné, není potřeba je měnit [30].

7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

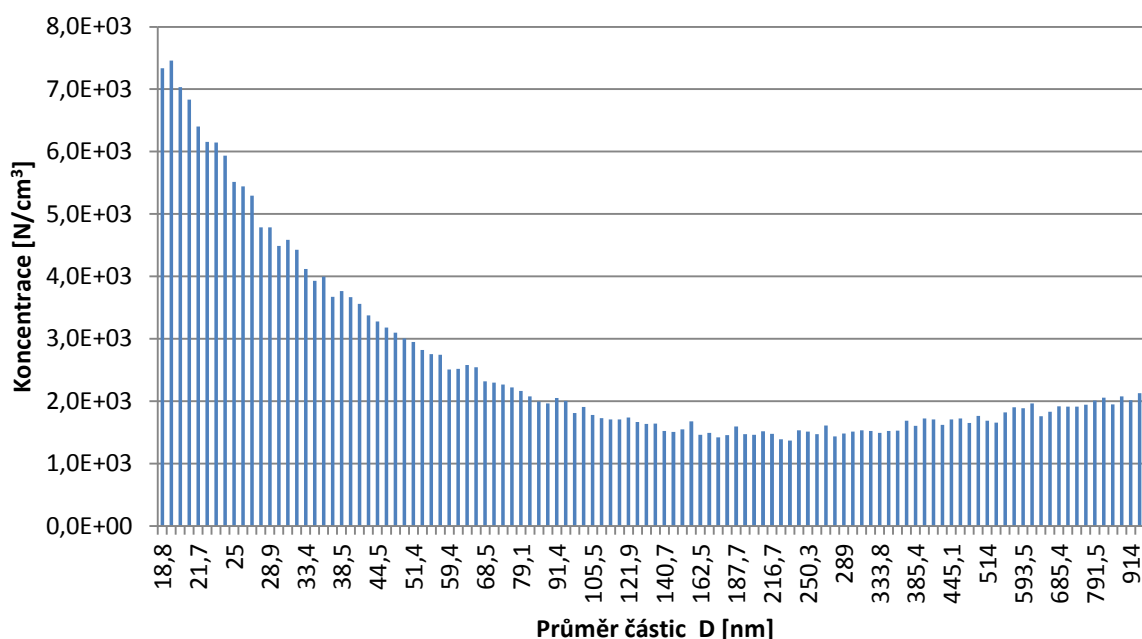
7.1 Seznámení s přístroji a prvotní měření

Dříve než bylo možné začít provádět samotná měření koncentrace jemných částic přímo na kotli na kotelně, bylo nutné se s jednotlivými měřicími přístroji seznámit a naučit se s nimi pracovat. Proto bylo potřeba nastudovat manuály k jednotlivým přístrojům. Následně se přístroje propojily tak, aby tvořily příslušnou měřicí sestavu.

Třídící přístroj se propojil s čítacím přístrojem a dále se připojil počítač s příslušným vyhodnocovacím programem. Po sestavení se testovala funkčnost přístrojů a jejich spolupráce, pro začátek se během několika měření zjišťovala koncentrace jemných částic z okolního vzduchu v místnosti.

Poté se k sestavě připojila ještě ředička, která se zapojuje na vstup třídícího přístroje. Opět se provedlo několik testovacích měření, při kterých se měnil ředící poměr.

Dalším krokem bylo provedení několika měření, při kterých se ředička nastavila na nulu, a proto musel měřený vzorek procházet přes HEPA filtr, přes který by neměly projít žádné částice. Ukázalo se však, že čítací zařízení nějaké částice zaznamenalo. Koncentrace jemných částic však byla asi o řád nižší. S největší pravděpodobností došlo k zachycení jemných částic, které se uvolnily někde v měřicích přístrojích, a dále to mohlo být způsobeno výrobním nastavením sčítacího přístroje, který je zřejmě nastaven tak, aby započítával i částice, které by se mohly při průchodu měřicí trati někde zachytit a do sčítacího prostoru by se vůbec nedostaly.



Graf 7.1: Naměřená koncentrace částic pozadí

Na základě těchto zkušebních měření bylo rozhodnuto, že toto naměřené pozadí se bude pokládat za nulovou hodnotu, protože při měření jemných částic ze spalovacího procesu bude jejich koncentrace o několik řádů vyšší. Tomu je potřeba přizpůsobit i ředicí poměr, který se musí zvolit tak, aby toto naměřené pozadí tvořilo chybu maximálně v jednotkách procent z naměřené koncentrace. Ředicí poměr se musí určit až přímo na kotelně dalšími měřeními tak, že se bude začínat od největšího ředicího poměru až do té chvíle, kdy bude optimální poměr mezi naměřenými hodnotami koncentrace částic pozadí a hodnotami koncentrace částic v měřeném vzorku.

7.2 Volba ředicího poměru

Jelikož se v tomto případě jedná o ředičku, kde je použitý ředicí disk s 10 dutinami, je možné volit ředicí poměr v rozmezí 15:1 až 300:1. Na ředičce je možno ředicí poměr nastavovat otočným knoflíkem, který má hodnoty 0 až 10, a pro zvýšení hodnoty je nutné otočit knoflíkem desetkrát. Jedna otáčka má ještě stupnici, která je rozdělena na 10 dílků, to umožňuje velmi jemnou změnu ředicího poměru.

Po odzkoušení různých ředicích poměrů vyšlo nejlépe nastavení ředičky na hodnotu 2,5, které odpovídá ředicí poměr 213.75:1, to znamená, že vzorek se skládá z jedné části spalín a z 213,75 částí vzduchu.

Výpočet ředicího poměru:

$$Rp = \frac{Rp_{max} - Rp_{min}}{n_{dílků}^{celkový}} \cdot (n_{dílků}^{celkový} - n_{dílků}^{nastavený}) \quad (27)$$

$$Rp_{2,5} = \frac{300 - 15}{1000} \cdot (1000 - 250) = 213,75$$

ředicí poměr [x:1]	hodnota na ředičce [-]	počet dílků $n_{dílků}^{nastavený}$
300,00	0,001	1
256,50	1	100
228,00	2	200
213,75	2,5	250
199,50	3	300
171,00	4	400
142,50	5	500
114,00	6	600
85,50	7	700
57,00	8	800
28,50	9	900
15,00	10	1000

Tab: 7.1: Ředicí poměry

Ředicí poměr pro danou hodnotu nastavenou na ředicím přístroji se vypočítal pomocí jednoduchého vztahu na základě minimálního a maximálního ředicího poměru

($R_{p_{min}}$, $R_{p_{max}}$), aktuální nastavené hodnoty a celkového rozsahu (počtu dílků n). Tento ředicí poměr po vynásobení s naměřenou koncentrací dává skutečnou koncentraci jemných částic ve zkoumaném vzorku spalín.

Po dostatečném seznámení se s přístroji bylo již možné celou měřicí sestavu rozpojit a převézt ji na kotelnu. Na kotelně se přístroje opět propojily a tím byly připraveny na měření koncentrace jemných částic na zkoušených kotlích. Na kotli VERNER A251 se provádělo měření na dvou různých typech paliva (pelet) a na kotli Ekoscroll V7 Ekonomick se měřilo při spalování jednoho paliva.

Na kotli zároveň probíhalo měření koncentrace plyných škodlivin a měření koncentrace TZL pomocí gravimetrické metody.

Pro vyhřívání trubic ředicího přístroje byla zvolena hodnota 80 °C, aby nedocházelo ke kondenzaci spalín.

7.3 Kotel VERNER A251 - palivo kávové pelety

První měření koncentrace jemných částic ve spalínách bylo provedeno pomocí metody SMPS na automatickém kotli VERNER A251.

Kotel již byl sestavený, zprovozněný a bylo možné připojit měřicí soustavu a začít s měřením. Ke kotli byl připevněný kouřovod, ve kterém byl připravený otvor pro zavedení odběrové sondy ředicího zařízení. Odběrová sonda byla ke kouřovodu upevněna pomocí matice a utěsněna pomocí hliníkové lepicí pásky.



Obr. 7.1: Měření na kotli VERNER A251

Byly provedeny čtyři série měření při spalování kávových pelet, pro každou sérii měření byl nastaven jiný výkon kotle. Výkon se měnil pomocí nastavení ventilátoru pro přívod spalovacího vzduchu, tzn. pomocí změny množství spalovacího vzduchu.



Obr. 7.2: Kávové pelety [31]

Jako palivo byly v tomto případě zvoleny pelety, které jsou vyrobené ze 100 % kávové sedliny. Kávové pelety však nemusí být vždy jen čistě z kávy, ale mohou být kombinací kávy a dřeva v určitém poměru. Vlhkost spalovaného paliva je 8,34 %. Palivo je do kotle dopravováno automaticky, pomocí šnekového dopravníku přímo do spalovacího prostoru. Palivo se sype do zásobníku paliva, který je součástí kotle.

7.3.1 Měření 1 – Kávové pelety

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	8
Celková doba měření	32 min

Tab 7.1: Nastavení parametrů 1. měření

V průběhu celého měření koncentrace jemných částic ve spalínách probíhalo kontinuální měření parametrů kotle, měřily různé hodnoty (vstupní/výstupní teplota vody, teplota okolí, teplota spalín, tlak vody, tlak spalín, výkon kotle). Pro výsledky této práce byly nejdůležitější parametry výkon kotle a teplota spalín.

Měření 1		
P_{\min}	23,10	kW
P_{\max}	27,90	kW
$P_{\text{stř}}$	24,98	kW
T_{spmin}	290,93	°C
T_{spmax}	305,07	°C
$T_{\text{spstř}}$	297,21	°C

Tab 7.2: Parametry kotle v průběhu 1. měření

Současně se měřila také koncentrace plyných znečišťujících látek a procentuální obsah kyslíku ve spalínách. Z plyných znečišťujících látek se měří koncentrace oxidu uhelnatého, oxidu dusnatého a oxidu siřičitého, přičemž naměřené byly pouze emise CO a NO.

Hodnoty koncentrace NO a CO jsou měřeny v jednotkách ppm, a proto je nutný jejich přepočet na mg/m^3 a poté ještě další přepočet na referenční hodnotu obsahu kyslíku (10 %), podle naměřeného obsahu kyslíku a následujících vztahů.

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
12:21	12,38	12:38	13,83
12:22	12,39	12:39	12,93
12:23	12,58	12:40	12,54
12:24	12,07	12:41	13,07
12:25	11,86	12:42	13,16
12:26	11,58	12:43	12,84
12:27	11,82	12:44	12,85
12:28	13,33	12:45	13,27
12:29	11,85	12:46	12,93
12:30	11,2	12:47	12,47
12:31	11,45	12:48	12,08
12:32	12,24	12:49	12,13
12:33	12,09	12:50	12,70
12:34	12,57	12:51	12,85
12:35	13,15	12:52	12,92
12:36	11,98	12:53	13,17
12:37	14,22	12:54	13,49
Střední hodnota obsahu O ₂			12,59 %

Tab 7.3: Kávové pelety měření 1 - Procentuální obsah kyslíku ve spalínách

Přepočet koncentrace z ppm na mg/m^3 [8]:

$$CO = CO_{ppm} \cdot \frac{M_{CO}}{V_M} = CO_{ppm} \cdot \frac{28,01}{22,414} [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (28)$$

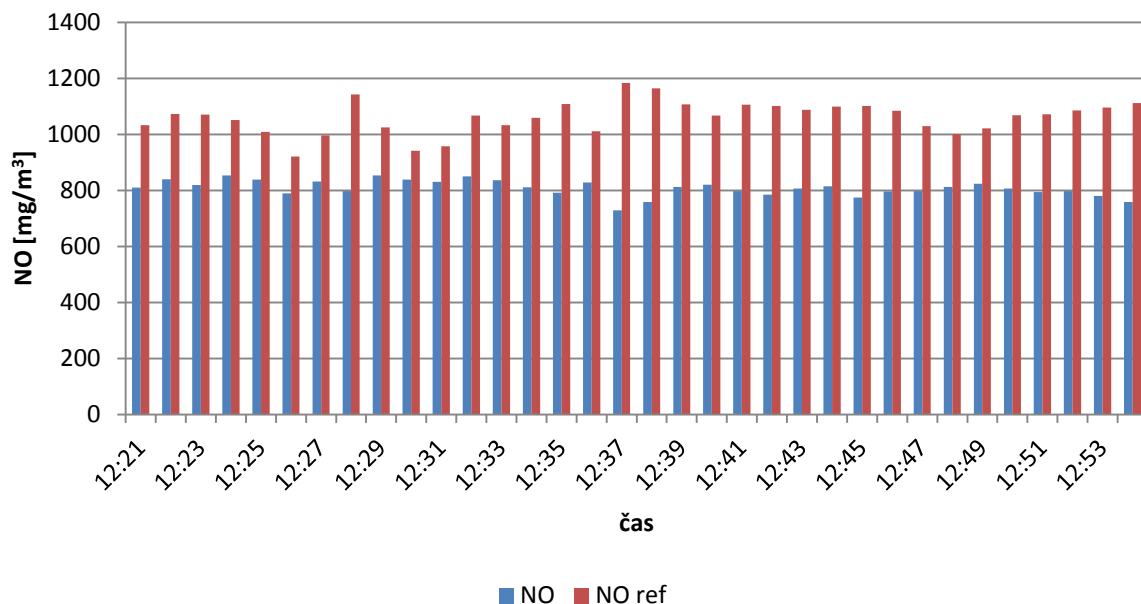
$$NO = NO_{ppm} \cdot \frac{M_{NO}}{V_M} = NO_{ppm} \cdot \frac{30,01}{22,414} [\text{mg}/\text{m}^3] \quad (29)$$

Přepočet na referenční obsah kyslíku (10 % O₂) [8]:

$$CO_{ref} = CO \cdot \left[\frac{(21 - O_{2ref})}{(21 - O_{2měř})} \right] [\text{mg}/\text{m}_n^3] \quad (30)$$

$$NO_{ref} = NO \cdot \left[\frac{(21 - O_{2ref})}{(21 - O_{2měř})} \right] [\text{mg}/\text{m}_n^3] \quad (31)$$

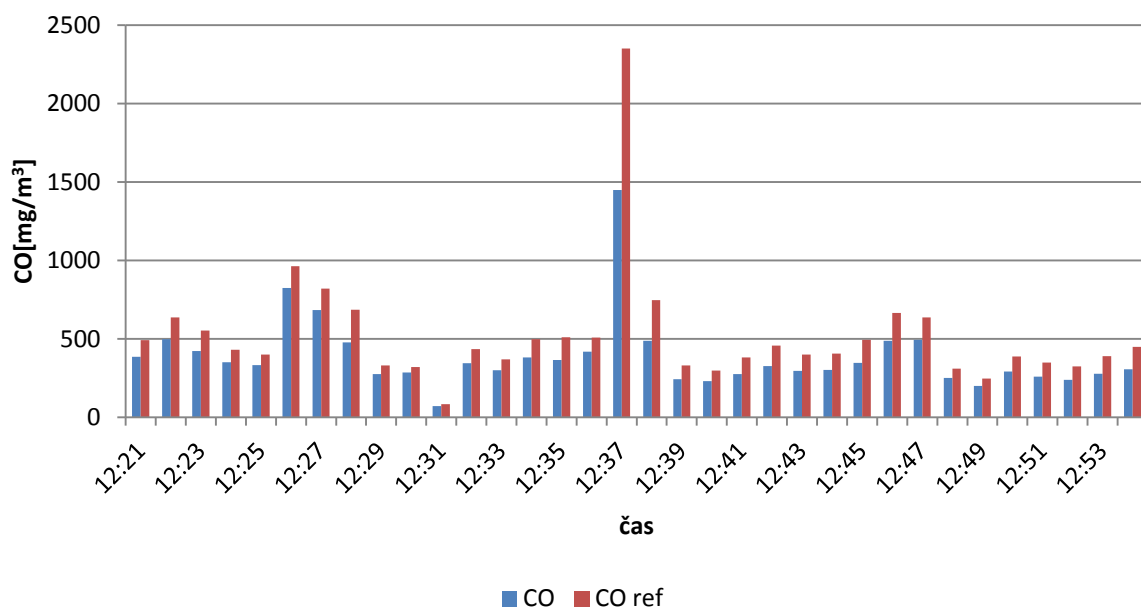
Na základě naměřených hodnot koncentrace plyných škodlivin vychází grafická závislost koncentrace na čase:



Graf 7.1: Kávové pelety měření 1 - Koncentrace NO v průběhu spalování

Pokud se zaměříme pouze na referenční hodnoty, které nám slouží k porovnávání různých typů paliva nebo různých spalovacích zařízení, vychází hodnoty NO referenční:

- $NO_{ref \min} = 921,12 \text{ mg/m}^3$
- $NO_{ref \text{ stř}} = 1061,13 \text{ mg/m}^3$
- **$NO_{ref \max} = 1183,00 \text{ mg/m}^3$**



Graf 7.2: Kávové pelety měření 1 - Koncentrace CO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty CO pro 1. měření.

- $CO_{ref\ min} = 82,30\ mg/m^3$
- $CO_{ref\ stř} = 518,32\ mg/m^3$
- **$CO_{ref\ max} = 2349,78\ mg/m^3$**

Při měření došlo v jeden okamžik k velkému nárůstu koncentrace CO, což bylo zřejmě způsobeno chvilkovým nedostatkem vzduchu.

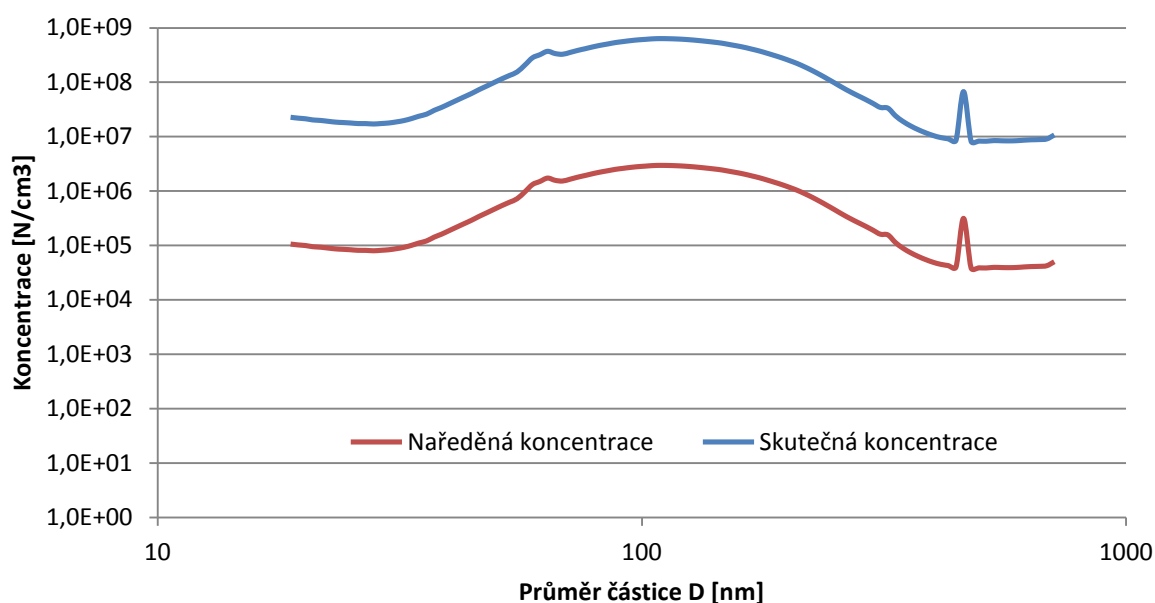
Koncentrace plyných škodlivin jsou jen doplňujícími informacemi pro úplnost měření, hlavní náplní této práce je koncentrace jemných částic ve spalínách.

Pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 12,59 %, které odpovídá průměrný výkon kotle 24,98 kW (přibližně 100 % výkon kotle), bylo realizováno osm měření početní koncentrace jemných částic v závislosti na průměru částic. Měřeno bylo v rozsahu 18,8 až 710 nm.

Po naměření se data exportovala do tabulkového editoru MS Excel, těchto osm měření se zprůměrovalo, aby se eliminovaly skokové odchylky a aby bylo jisté, že toto měření je přesné.

Od naměřených koncentrací se odečetla koncentrace jemných částic pozadí naměřená při průtoku vzorku přes HEPA filtr. A následně bylo nutné naměřené koncentrace vynásobit ředicím poměrem (hodnotou 213,75), aby výsledné hodnoty odpovídaly reálným koncentracím jemných částic v odebíraných vzorcích spalin.

Výsledkem je grafické znázornění:

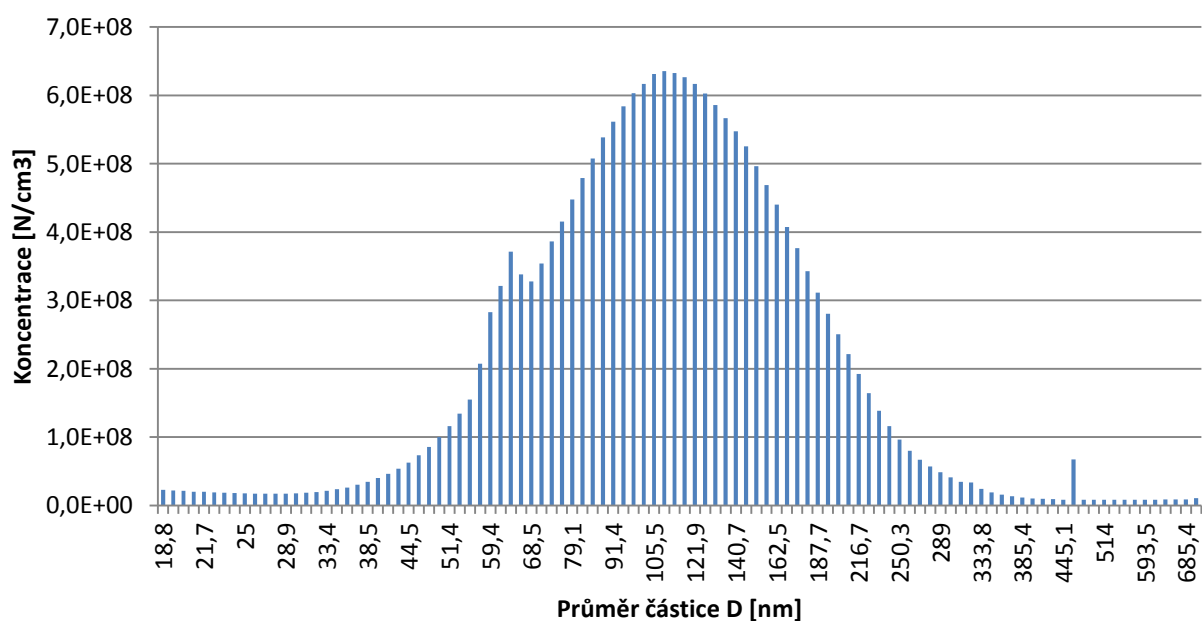


Graf 7.3: Kávové pelety měření 1 - Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota obsahu O_2 ve spalínách 12,59 %

Z grafu 7.3 je vidět, že ředění nijak neovlivní výsledný tvar závislosti, ale pouze křivku posune směrem nahoru, což odpovídá vynásobení ředicím poměrem.

D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]
18,8	22769198,8	47,8	85472656,8	121,9	616846942,3	310,6	34532422,3
19,5	21922173,2	49,6	100158919,5	126,3	602753070,4	322,0	33501822,7
20,2	21341747,7	51,4	116311853,3	131,0	585843296,5	333,8	24221226,6
20,9	20343841,9	53,3	134211259,9	135,8	566646483,0	346,0	19073346,4
21,7	19900420,8	55,2	154880843,8	140,7	547160969,3	358,7	15776216,0
22,5	19172858,4	57,3	207659788,3	145,9	525311947,9	371,8	13476651,6
23,3	18534563,9	59,4	282662188,3	151,2	496419855,4	385,4	11785026,7
24,1	18213667,9	61,5	321131947,6	156,8	468529326,7	399,5	10505505,5
25,0	17885481,7	63,8	371095232,6	162,5	440147740,8	414,2	9635909,5
25,9	17449319,7	66,1	338157642,2	168,5	407474723,4	429,4	9131009,1
26,9	17419652,6	68,5	327667525,0	174,7	376612878,3	445,1	8573237,2
27,9	17129990,2	71,0	353870505,0	181,1	342764990,7	461,4	67586522,7
28,9	17466655,3	73,7	386479543,7	187,7	311300624,4	478,3	8243912,4
30,0	17886689,8	76,4	415565171,0	194,6	280699098,8	495,8	8313999,9
31,1	18725075,7	79,1	447797815,4	201,7	250492250,0	514,0	8267803,9
32,2	19767862,7	82,0	478963411,7	209,1	221638372,0	532,8	8488413,9
33,4	21524379,4	85,1	507653799,5	216,7	192372230,4	552,3	8417623,6
34,6	23783837,4	88,2	538419952,3	224,7	164310229,6	572,5	8382852,2
35,9	25988417,6	91,4	561213634,0	232,9	138785404,1	593,5	8442873,2
37,2	30471373,5	94,7	583903600,5	241,4	116142514,6	615,3	8635779,1
38,5	34413077,3	98,2	603062594,0	250,3	96431552,6	637,8	8785084,7
40,0	40320698,4	101,8	616791975,3	259,5	79975010,3	661,2	8855289,5
41,4	46534091,5	105,5	630971161,4	269,0	67116119,2	685,4	9087651,3
42,9	53863003,3	109,4	635580955,3	278,8	57075942,6	710,5	10764124,5
44,5	62580092,3	113,4	632769298,9	289,0	48706484,1		
46,1	73592677,7	117,6	626701278,0	299,6	41138436,8		

Tab. 7.4: Kávové pelety měření 1 – Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.4: Kávové pelety měření 1 – Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 12,59 %

Druhý graf je přehlednější a lze z něj snadno vyčíst koncentraci pro každou měřenou velikost částic v celém rozsahu měření. Pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 12,59 % mají maximální koncentraci částice o průměru 109,4 nm. Maximální koncentrace částic je $6,35\text{E}+8 \text{ N/cm}^3$, což se dá přepočítat na $6,35\text{E}+14 \text{ N/m}^3$.

7.3.2 Měření 2 – Kávové pelety

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	13
Celková doba měření	86 min

Tab 7.4: Nastavení parametrů 2. měření

Před měřením se změnilo nastavení vzduchového ventilátoru, snížily se otáčky, a proto se snížilo množství spalovacího vzduchu dodávaného do procesu spalování. To se projevilo nejen snížením hodnot měřených parametrů kotle, ale samozřejmě také na produkci jemných částic a plynných škodlivin ve spalínách.

Měření 2		
P_{\min}	21,10	kW
P_{\max}	24,90	kW
$P_{\text{stř}}$	23,30	kW
T_{spmin}	246,82	°C
T_{spmax}	269,863	°C
$T_{\text{spstř}}$	265,94	°C

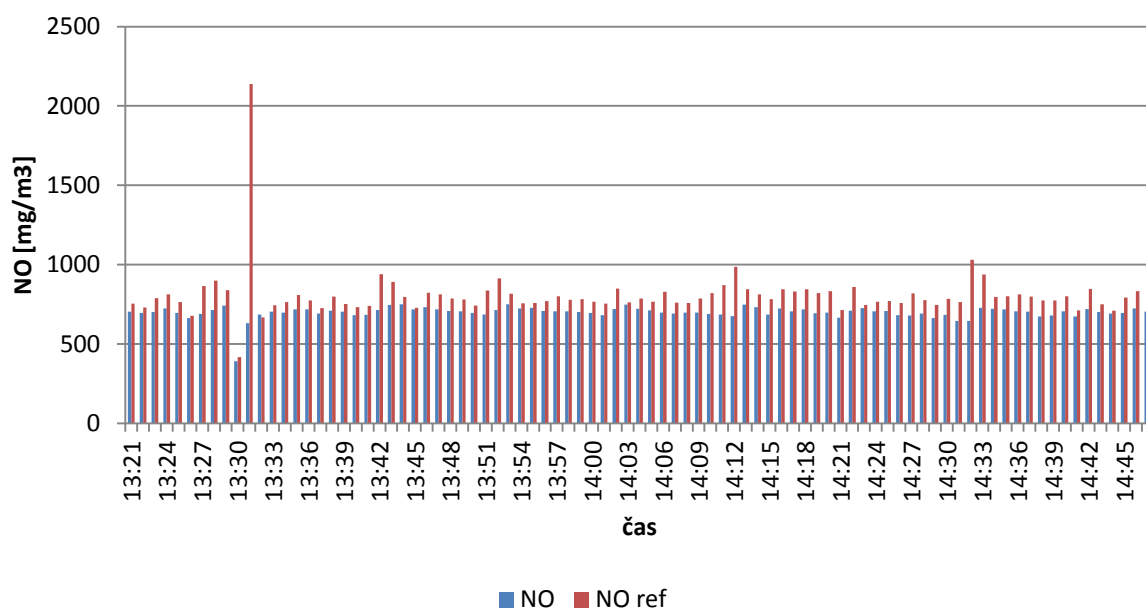
Tab. 7.5 Parametry kotle v průběhu 2. měření

Z plynných škodlivin byly opět naměřeny pouze emise NO a CO a obsah kyslíku ve spalínách. Tím, že se snížil výkon vzduchového ventilátoru, došlo k mírnému snížení obsahu kyslíku ve spalínách. Pokud porovnáme střední hodnotu obsahu kyslíku z druhého měření s prvním měřením, došlo ke snížení obsahu kyslíku o 1,27 %.

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
13:21	10,73	13:43	11,81	14:05	10,77	14:27	11,89
13:22	10,53	13:44	10,63	14:06	11,73	14:28	11,19
13:23	11,22	13:45	10,15	14:07	10,99	14:29	11,20
13:24	11,21	13:46	11,22	14:08	10,87	14:30	11,41
13:25	10,98	13:47	11,30	14:09	11,24	14:31	11,72
13:26	10,23	13:48	11,10	14:10	11,76	14:32	14,11
13:27	12,23	13:49	11,06	14:11	12,34	14:33	12,46
13:28	12,28	13:50	10,71	14:12	13,46	14:34	11,03
13:29	11,27	13:51	12,00	14:13	11,25	14:35	11,14
13:30	10,68	13:52	12,40	14:14	11,10	14:36	11,46
13:31	17,75	13:53	10,89	14:15	11,36	14:37	11,29
13:32	9,68	13:54	10,48	14:16	11,58	14:38	11,43
13:33	10,59	13:55	10,44	14:17	11,66	14:39	11,36
13:34	10,96	13:56	10,88	14:18	11,66	14:40	11,32
13:35	11,24	13:57	11,32	14:19	11,69	14:41	10,61
13:36	10,80	13:58	11,04	14:20	11,80	14:42	11,65
13:37	10,52	13:59	11,15	14:21	10,75	14:43	10,72
13:38	11,21	14:00	11,03	14:22	11,90	14:44	10,28
13:39	10,72	14:01	11,08	14:23	10,30	14:45	11,34
13:40	10,76	14:02	11,67	14:24	10,86	14:46	11,44
13:41	10,85	14:03	10,19	14:25	10,90	14:47	11,89
13:42	12,63	14:04	10,89	14:26	11,13		
Střední hodnota obsahu O ₂							11,32 %

Tab 7.6: Kávové pelety měření 2 -- Procentuální obsah kyslíku ve spalínách

V závislosti na snížení množství spalovacího vzduchu došlo ke snížení koncentrace NO, z čehož lze usuzovat, že došlo ke snížení teploty spalování, potvrzuje to i nižší naměřená teplota spalin. Naměřené hodnoty jsou v průběhu měření skoro konstantní, objevuje se pouze jedna větší odchylka, která může být způsobena chvilkovým zvýšením teploty spalování.

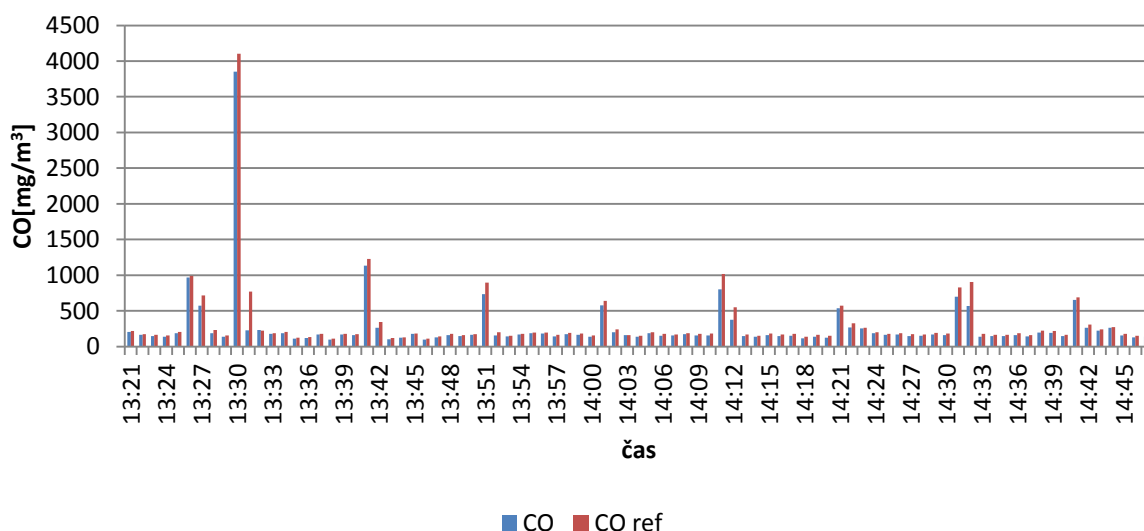


Graf 7.7: Kávové pelety měření 2 - Koncentrace NO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty NO pro 2. měření:

- $\text{NO}_{\text{ref min}} = 416,19 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref stř}} = 808,41 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{NO}_{\text{ref max}} = 2138,74 \text{ mg/m}^3$**

Naměřené koncentrace CO stále nejsou nijak vysoké, protože do spalovacího procesu je dodáváno stále dostatečné množství vzduchu, a tím je zajištěn dostatečný přebytek.

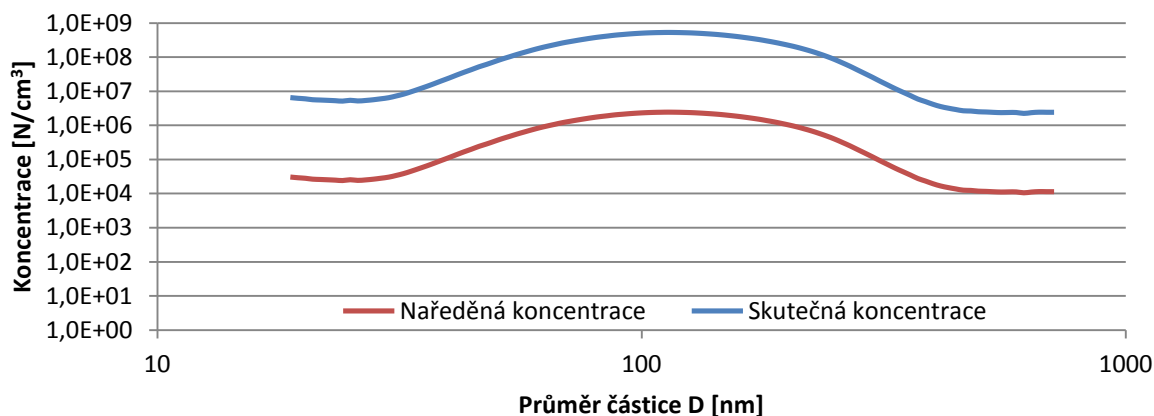


Graf 7.8: Kávové pelety měření 2 - Koncentrace CO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty CO pro 2. měření:

- $\text{CO}_{\text{ref min}} = 109,64 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}_{\text{ref stř}} = 315,00 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{CO}_{\text{ref max}} = 4103,80 \text{ mg/m}^3$**

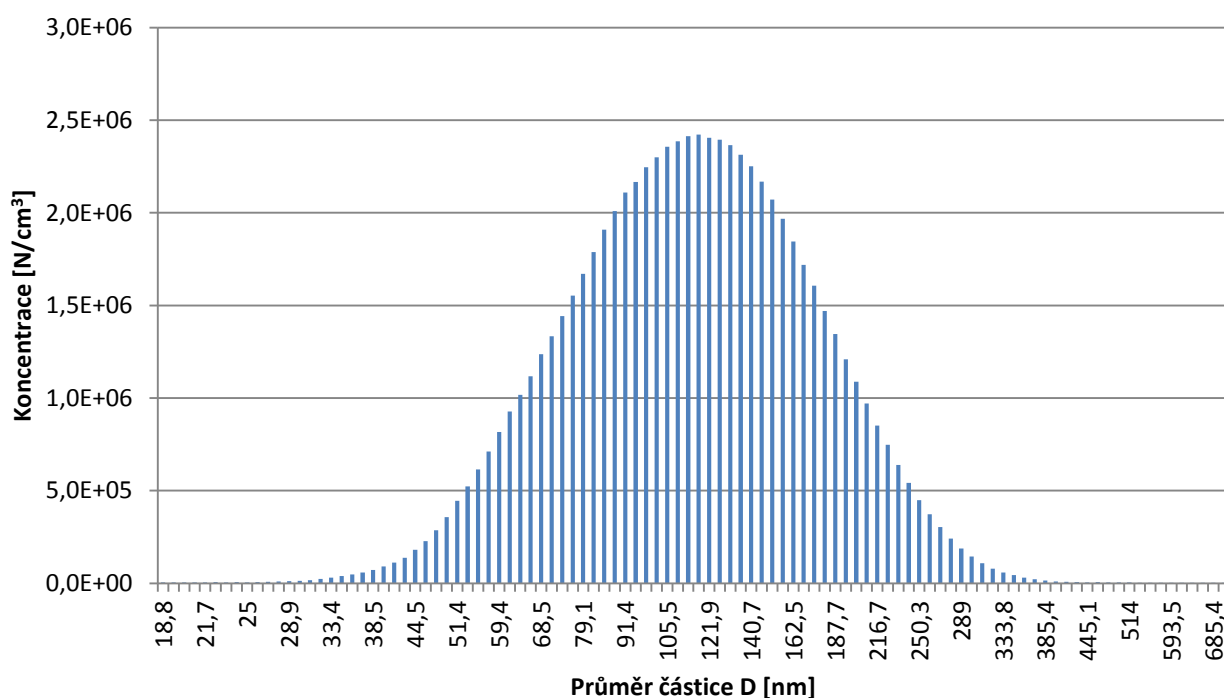
Pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 11,32 %, a té odpovídající průměrný výkon kotle 23,3 kW, bylo realizováno 13 kompletních měření, další měření selhala a nedoběhla do konce. Koncentrace jemných částic byla měřena v rozsahu 18,8 až 710 nm.



Graf 7.9: Kávové pelety měření 2 - Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota obsahu O_2 ve spalínách 11,32 %

D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace
[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]
18,8	6550383,2	47,8	61020402,9	121,9	515541404,1	310,6	19658015,7
19,5	6245331,7	49,6	73126042,1	126,3	507516285,2	322,0	15303485,4
20,2	6020875,7	51,4	86962858,2	131,0	495590668,0	333,8	11895177,7
20,9	5677975,8	53,3	101705599,8	135,8	480161486,0	346,0	9443652,2
21,7	5550030,2	55,2	118837957,0	140,7	464338434,6	358,7	7512028,7
22,5	5438678,5	57,3	138389363,3	145,9	445067937,1	371,8	5928477,9
23,3	5308666,2	59,4	159834228,4	151,2	422738277,8	385,4	4998232,3
24,1	5167726,5	61,5	182134215,3	156,8	399761450,6	399,5	4164399,5
25,0	5451427,7	63,8	206132239,6	162,5	375344249,0	414,2	3586591,9
25,9	5222452,0	66,1	230088922,5	168,5	349491028,1	429,4	3216570,2
26,9	5395873,2	68,5	257188049,9	174,7	324396795,2	445,1	2936033,3
27,9	5669114,6	71,0	281899749,6	181,1	296479483,4	461,4	2696846,7
28,9	6033782,6	73,7	308732030,2	187,7	270785051,8	478,3	2653926,9
30,0	6491265,6	76,4	335788656,1	194,6	243888915,3	495,8	2527876,5
31,1	7295865,2	79,1	362147347,8	201,7	218630235,2	514,0	2487804,4
32,2	8247899,9	82,0	387323484,0	209,1	193904132,8	532,8	2425444,4
33,4	9702662,1	85,1	411585321,2	216,7	169001882,4	552,3	2383002,9
34,6	11506614,7	88,2	436930301,4	224,7	145704753,4	572,5	2402776,2
35,9	13770738,0	91,4	456118863,2	232,9	123488574,4	593,5	2400207,2
37,2	16574191,5	94,7	475136913,0	241,4	103398920,5	615,3	2260256,3
38,5	19945539,2	98,2	491497364,1	250,3	84730404,8	637,8	2376943,4
40,0	24400616,5	101,8	504938984,5	259,5	67916852,8	661,2	2452649,9
41,4	29545584,3	105,5	514064565,6	269,0	53985834,8	685,4	2436810,4
42,9	35747431,4	109,4	520164998,6	278,8	42136486,5	710,5	2436025,1
44,5	42987408,9	113,4	523566849,2	289,0	32894303,6		
46,1	51899282,3	117,6	520400792,8	299,6	25595331,4		

Tab. 7.7: Kávové pelety měření 2 – Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.10: Kávové pelety měření 2 – Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 11,32 %

Z grafu a z tabulky můžeme vyčíst, že pro střední hodnotu kyslíku ve spalínách 11,32 % mají maximální koncentraci částice o průměru 113,4 nm. Maximální koncentrace částic je $5,23 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$, což se dá přepočítat na $5,23 \times 10^{14} \text{ N/m}^3$.

7.3.3 Měření 3 – Kávové pelety

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	7
Celková doba měření	28 min

Tab 7.8: Nastavení parametrů 3. měření

Před třetí sérií měření se znovu snížily otáčky vzduchového ventilátoru, a proto došlo ke snížení množství spalovacího vzduchu. Odezvou na tuto změnu byly změny měřených parametrů kotle.

Měření 3		
P_{\min}	8,19	kW
P_{\max}	24,41	kW
$P_{\text{stř}}$	13,54	kW
T_{spmin}	140,29	°C
T_{spmax}	226,232	°C
$T_{\text{spstř}}$	166,09	°C

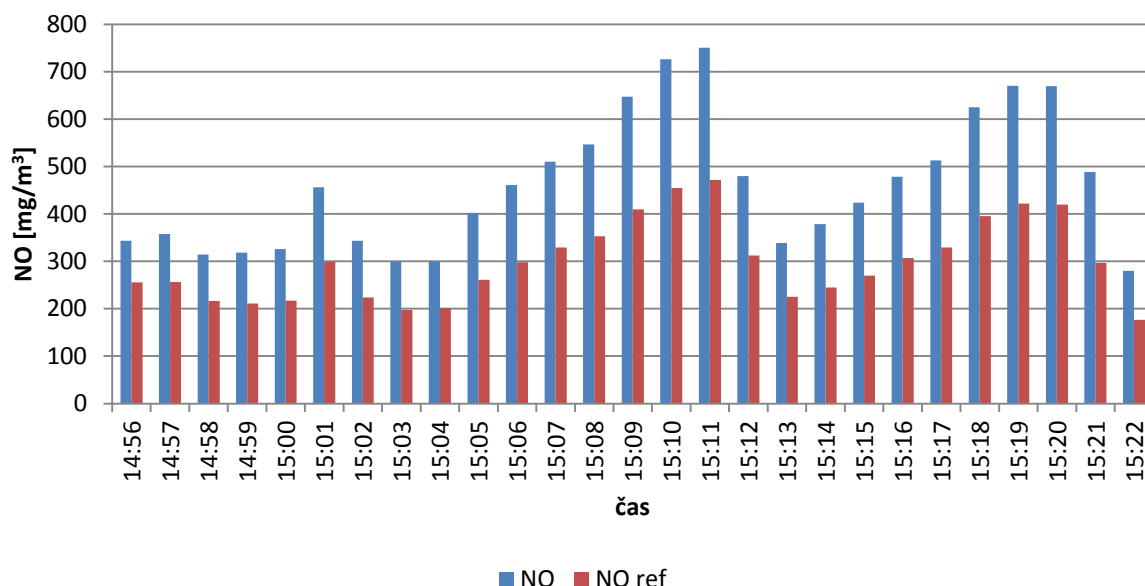
Tab. 7.9: Parametry kotle v průběhu 3. měření

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
14:56	6,22	15:10	3,44
14:57	5,66	15:11	3,49
14:58	5,01	15:12	4,11
14:59	4,40	15:13	4,46
15:00	4,48	15:14	3,98
15:01	4,22	15:15	3,75
15:02	4,13	15:16	3,86
15:03	4,31	15:17	3,85
15:04	4,63	15:18	3,61
15:05	4,07	15:19	3,51
15:06	3,99	15:20	3,46
15:07	3,94	15:21	2,89
15:08	3,95	15:22	3,60
15:09	3,60		
Střední hodnota obsahu O ₂			4,10 %

Tab 7.10: Kávové pelety měření 3 – Procentuální obsah kyslíku ve spalínách

Z měřených parametrů kotle a měřené koncentrace plyných škodlivin, je vidět, že spalovací proces neprobíhá zcela optimálně, střední hodnota výkonu klesla na 13,54 kW, což je asi 54 % výkonu, stále se pohybujeme v rozmezí regulace kotle, ale koncentrace plyných znečišťujících látek se výrazně mění.

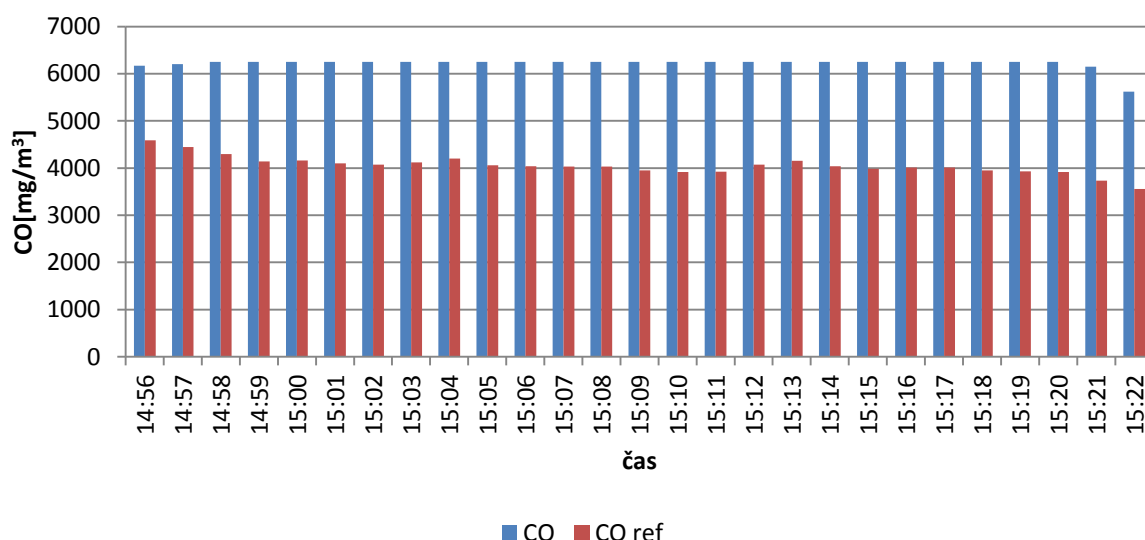
V závislosti na nízké teplotě spalování výrazně klesla koncentrace NO, naopak koncentrace CO se zvýšila až nad měřitelné maximum, což souvisí s velice nízkým obsahem kyslíku ve spalínách, který je proti prvnímu měření nižší o 8,49 %. A navíc se objevila naměřená koncentrace SO₂.



Graf 7.11: Kávové pelety měření 3 – Koncentrace NO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty NO pro 3. měření:

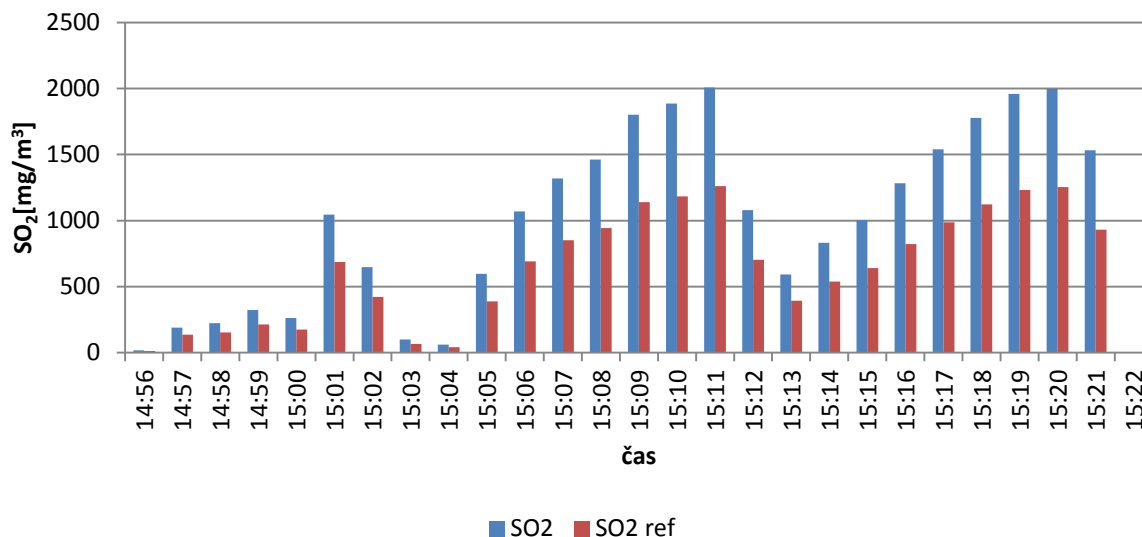
- $\text{NO}_{\text{ref min}} = 176,77 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref stř}} = 298,23 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{NO}_{\text{ref max}} = 471,49 \text{ mg/m}^3$**



Graf 7.12: Kávové pelety měření 3 – Koncentrace CO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty CO pro 3. měření:

- $CO_{\text{ref min}} = 3554,16 \text{ mg/m}^3$
- $CO_{\text{ref stř}} = 4053,74 \text{ mg/m}^3$
- **$CO_{\text{ref max}} = 4590,10 \text{ mg/m}^3$**



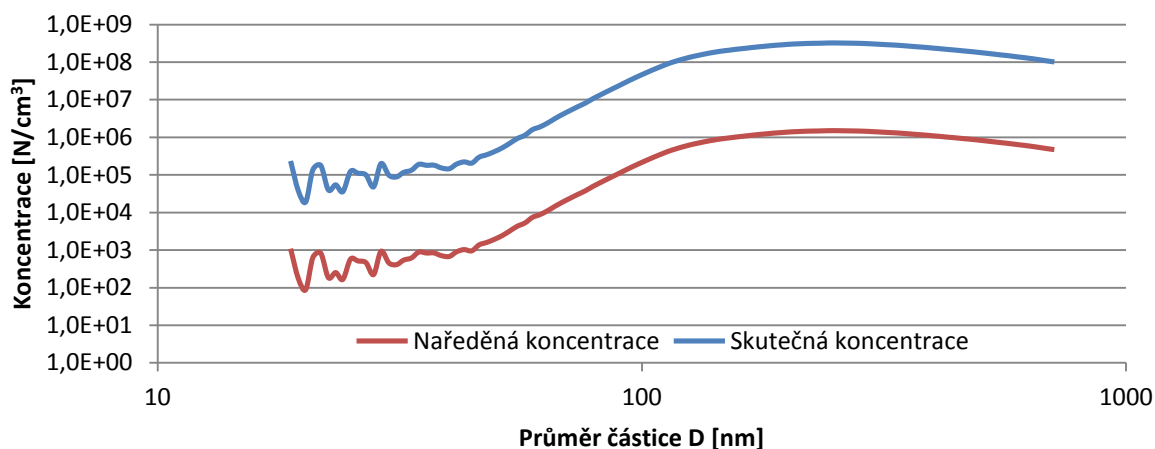
Graf 7.13: Kávové pelety měření 3 – Koncentrace SO_2 v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty SO_2 pro 3. měření:

- $SO_{2\text{ref min}} = 109,64 \text{ mg/m}^3$
- $SO_{2\text{ref stř}} = 315,00 \text{ mg/m}^3$
- **$SO_{2\text{ref max}} = 4103,80 \text{ mg/m}^3$**

Pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 4,10 %, a té odpovídající průměrný výkon kotle 13,4 kW, bylo realizováno 7 měření, koncentrace jemných částic byla měřena v rozsahu 18,8 až 710 nm.

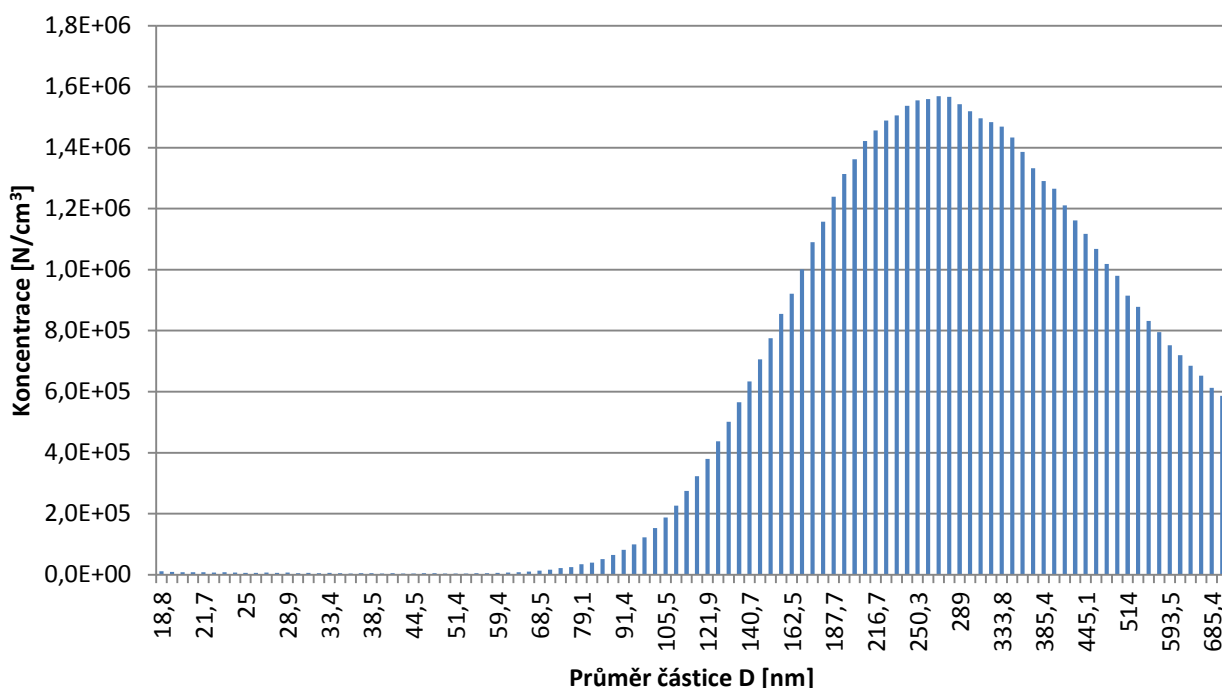
Po exportu naměřených dat do MS Excel se odečetly hodnoty pozadí a koncentrace se vynásobily ředicím poměrem (213,75). Výsledkem jsou skutečné hodnoty koncentrace jemných částic ve spalínách.



Graf 7.14: Kávové pelety měření 3 - Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota obsahu O_2 ve spalínách 4,1 %

D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]
18.8	234970.5	47.8	344653.4	121.9	121556236.7	310.6	296153899.1
19.5	38256.1	49.6	418627.8	126.3	137047265.6	322.0	288587940.1
20.2	19045.9	51.4	521381.6	131.0	151765957.0	333.8	281914317.7
20.9	136564.2	53.3	691573.8	135.8	167115861.3	346.0	273190854.1
21.7	178266.7	55.2	921657.6	140.7	181412245.0	358.7	263117312.1
22.5	39869.8	57.3	1134049.8	145.9	195403892.3	371.8	253626659.5
23.3	54454.3	59.4	1599290.9	151.2	206675615.6	385.4	245322960.8
24.1	35772.0	61.5	1883469.2	156.8	219304300.3	399.5	234920137.3
25.0	123935.8	63.8	2388095.6	162.5	230544918.3	414.2	225580089.9
25.9	110794.3	66.1	3144709.9	168.5	243128447.9	429.4	215654720.9
26.9	100263.3	68.5	4057667.2	174.7	255463561.7	445.1	207484565.2
27.9	48112.0	71.0	5133215.9	181.1	266263804.6	461.4	197975680.8
28.9	200098.5	73.7	6520516.4	187.7	278376925.6	478.3	189671591.2
30.0	98492.9	76.4	8143737.6	194.6	287072665.8	495.8	180648346.9
31.1	88386.2	79.1	10557476.8	201.7	297643019.0	514.0	171696147.2
32.2	116855.7	82.0	13378645.9	209.1	304624756.0	532.8	162592306.2
33.4	133020.2	85.1	17019495.6	216.7	310418064.9	552.3	154410692.7
34.6	190951.5	88.2	21314556.9	224.7	314516129.6	572.5	146968908.7
35.9	180186.7	91.4	26758461.0	232.9	316593143.1	593.5	138318683.1
37.2	181092.6	94.7	33563799.3	241.4	321570708.0	615.3	131139630.3
38.5	153390.9	98.2	41727085.1	250.3	322267672.2	637.8	123452942.9
40.0	146245.4	101.8	51397850.1	259.5	320172332.2	661.2	115542738.4
41.4	193937.6	105.5	62801271.1	269.0	317931865.4	685.4	107691731.7
42.9	222016.2	109.4	76027457.3	278.8	315224886.4	710.5	100942075.3
44.5	205784.8	113.4	91253903.8	289.0	310812974.8		
46.1	297181.6	117.6	106308482.4	299.6	303626242.3		

Tab. 7.11: Kávové pelety měření 3 - Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.15: Kávové pelety měření 3 – Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 4,1 %

Z grafu a z tabulky můžeme vyčíst, že pro střední hodnotu kyslíku ve spalínách 4,10 % mají maximální koncentraci částice o průměru 250,3 nm. Maximální koncentrace částic je $3,22\text{E}+8 \text{ N/cm}^3$, což se dá přepočítat na $3,22\text{E}+14 \text{ N/m}^3$.

Maximální koncentrace se posunula výrazně doprava k větším průměrům.

7.3.4 Měření 4 – Kávové pelety

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	6
Celková doba měření	24 min

Tab 7.12: Nastavení parametrů 4. měření

Před čtvrtou sérií měření bylo nutné zvýšit otáčky vzduchového ventilátoru, protože při třetím měření už neprobíhalo spalování správně. Přebytek vzduchu už nebyl dostačující. Množství spalovacího vzduchu dodávaného do spalování se proto o něco zvýšilo. Na vyšší množství spalovacího vzduchu reaguje výkon kotle, který je nad 100 %. To je nejspíš způsobeno vysokým množstvím CO jako hořlavého materiálu ve spalovací komoře.

Měření 4		
P_{\min}	28,15	kW
P_{\max}	29,8	kW
$P_{\text{stř}}$	28,87	kW
T_{spmin}	250,63	°C
T_{spmax}	260,17	°C
$T_{\text{spstř}}$	255,28	°C

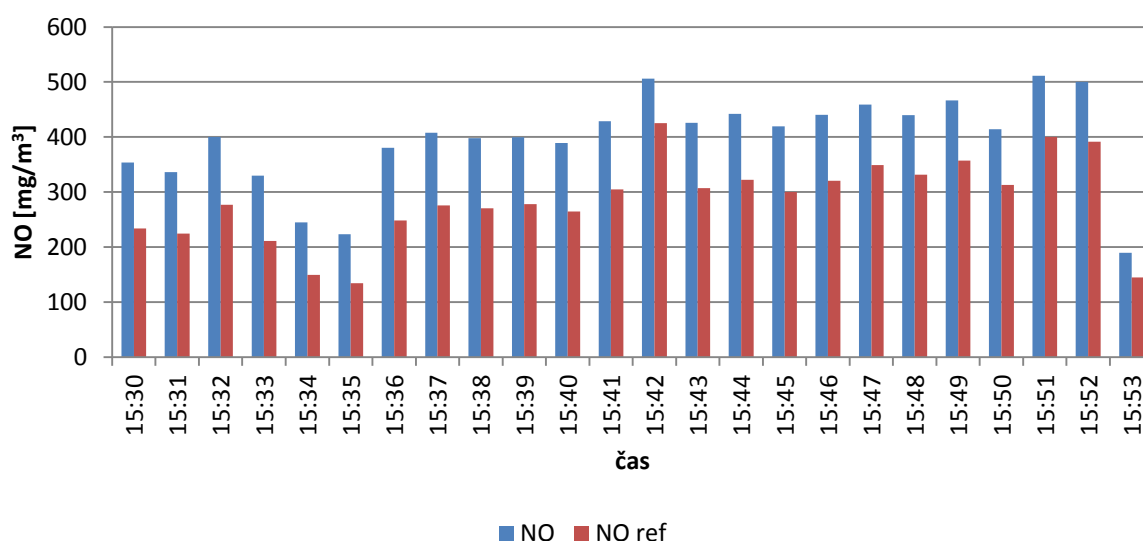
Tab. 7.13: Parametry kotle v průběhu 4. měření

Naměřeny byly koncentrace NO a CO, došlo ke snížení obsahu kyslíku ve spalínách a úplně zmizely emise SO_2 . Pokud porovnáme tyto hodnoty s prvním měřením, střední hodnota obsahu kyslíku je nižší o 7,16 %.

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
15:30	4,35	15:42	7,91
15:31	4,52	15:43	5,75
15:32	5,12	15:44	5,92
15:33	3,83	15:45	5,64
15:34	2,96	15:46	5,89
15:35	2,74	15:47	6,53
15:36	4,15	15:48	6,41
15:37	4,76	15:49	6,63
15:38	4,81	15:50	6,44
15:39	5,19	15:51	6,94
15:40	4,82	15:52	6,94
15:41	5,53	15:53	6,60
Střední hodnota obsahu O ₂			5,43 %

Tab 7.14: Měření 4 - Procentuální obsah kyslíku ve spalínách

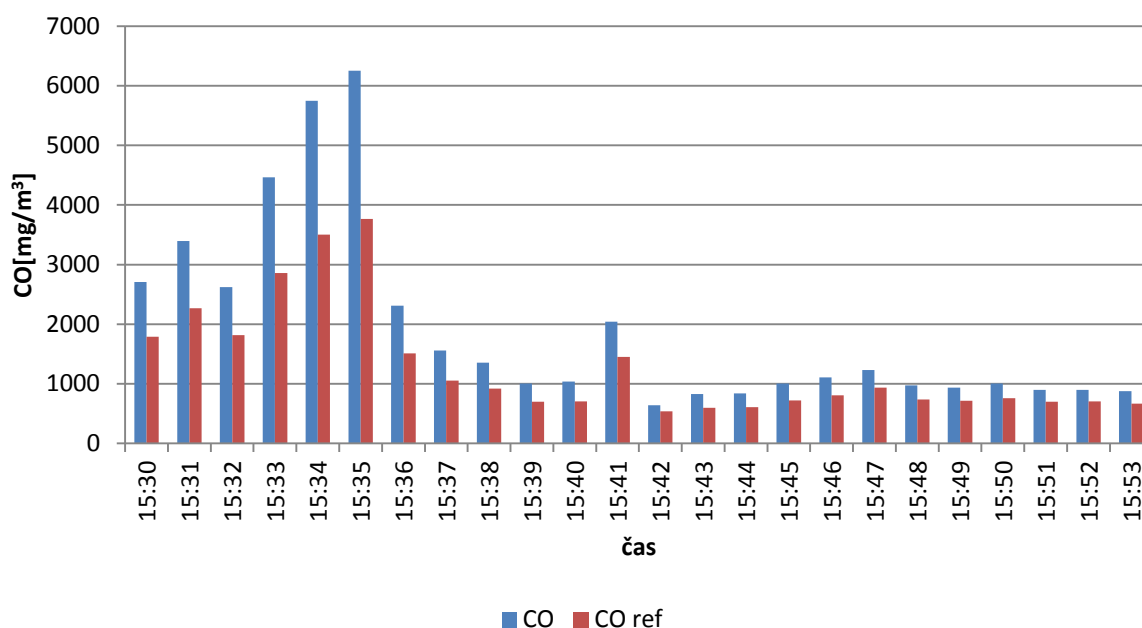
Protože tentokrát došlo ke zvýšení přebytku vzduchu, vliv na plynné škodliviny ve spalínách je opačný. Dochází ke zvyšování teploty spalování, a tak rostou emise NO, naopak klesá koncentrace CO, kvůli většímu přebytku vzduchu.



Graf 7.16: Kávové pelety měření 4 – Koncentrace NO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty NO pro 4. měření:

- $\text{NO}_{\text{ref min}} = 134,60 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref stř}} = 284,89 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref max}} = 425,43 \text{ mg/m}^3$



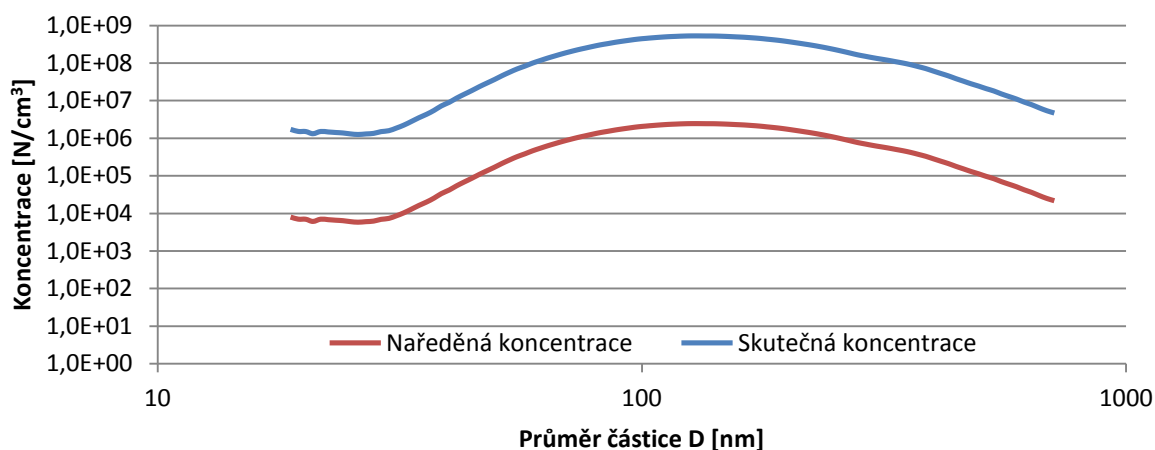
Graf 7.17: Kávové pelety měření 4 – Koncentrace CO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty CO pro 4. měření:

- $CO_{ref\ min} = 536,78\ mg/m^3$
- $CO_{ref\ stř} = 1284,76\ mg/m^3$
- **$CO_{ref\ max} = 3765,06\ mg/m^3$**

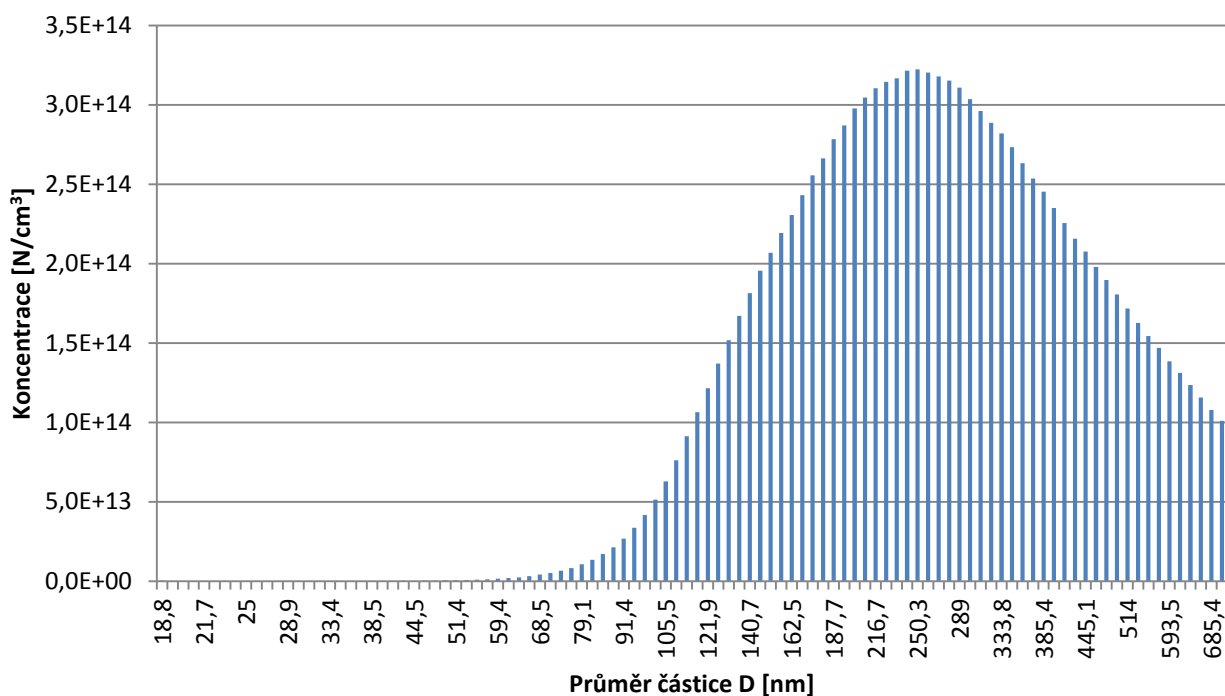
Pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 5,43 %, a té odpovídající průměrný výkon kotle 23,3 kW, bylo realizováno 13 kompletních měření, další měření selhalo. Koncentrace jemných částic byla měřena v rozsahu 18,8 až 710 nm.

Po exportu naměřených dat do MS Excel a odečtení naměřených hodnot pozadí, byly tyto hodnoty vynásobené ředicím poměrem (213,75). Výsledkem jsou skutečné hodnoty koncentrace jemných částic ve spalínách.

Graf 7.18: Kávové pelety měření 4 – Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota O_2 ve spalínách 5,43 %

D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]	D [nm]	Koncentrace [N/cm ³]
18.8	1721958.6	47.8	29213081.5	121.9	521440520.4	310.6	127983058.4
19.5	1515140.1	49.6	36515785.1	126.3	526295318.9	322.0	118666268.1
20.2	1507738.3	51.4	46048966.8	131.0	526106138.6	333.8	108752378.9
20.9	1318668.8	53.3	57103556.9	135.8	523837434.5	346.0	99947262.9
21.7	1513684.3	55.2	69497016.9	140.7	522734688.0	358.7	90409938.2
22.5	1466517.3	57.3	82813730.3	145.9	516078482.3	371.8	80377994.3
23.3	1420498.3	59.4	99393935.8	151.2	506471360.0	385.4	71201824.1
24.1	1379632.4	61.5	115541444.1	156.8	495365193.9	399.5	61181017.0
25.0	1301924.7	63.8	134847332.6	162.5	484643009.6	414.2	52695964.5
25.9	1258156.4	66.1	154659964.7	168.5	469145428.1	429.4	45469166.4
26.9	1299232.7	68.5	176606837.5	174.7	453079803.3	445.1	38372843.4
27.9	1344067.4	71.0	199873088.4	181.1	431921184.4	461.4	32824345.9
28.9	1496772.9	73.7	225420147.8	187.7	412642705.6	478.3	28021871.2
30.0	1586887.0	76.4	249873581.0	194.6	390688436.3	495.8	24301425.0
31.1	1865909.6	79.1	275814298.2	201.7	366546654.7	514.0	20786939.2
32.2	2222832.5	82.0	303939033.6	209.1	342247860.5	532.8	18068865.2
33.4	2791150.4	85.1	329459419.8	216.7	319281412.3	552.3	15081687.7
34.6	3504016.7	88.2	357023864.8	224.7	296690601.0	572.5	12889656.1
35.9	4333782.7	91.4	382399201.2	232.9	273397423.4	593.5	11014210.9
37.2	5508912.8	94.7	407732631.8	241.4	250102347.1	615.3	9148966.2
38.5	7224950.1	98.2	433337167.5	250.3	227087397.9	637.8	7803335.4
40.0	9055678.3	101.8	452207325.3	259.5	205116168.0	661.2	6429243.0
41.4	11656628.6	105.5	470443397.4	269.0	183942357.3	685.4	5392216.6
42.9	14690781.1	109.4	486999411.6	278.8	165196713.2	710.5	4674169.7
44.5	18469103.3	113.4	501820883.3	289.0	151240355.2		
46.1	23389461.0	117.6	511587195.2	299.6	138513629.8		

Tab. 7.15: Kávové pelety měření 4 – Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.19: Kávové pelety měření 4 - Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 5,43 %

Z grafu a z tabulky můžeme vyčíst, že pro střední hodnotu kyslíku ve spalínách 5,43 % mají maximální koncentraci částice o průměru 126,3 nm. Maximální koncentrace částic je $5,26 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$, což se dá přepočítat na $5,26 \times 10^{14} \text{ N/m}^3$.

Maximální koncentrace se při mírném zvýšení množství spalovacího vzduchu znovu posouvá spíše k menším částicím.

Tím bylo dokončeno experimentální měření přítomnosti jemných částic ve spalínách při spalování kávových pelet na kotli VERNER A251.

7.4 Kotel VERNER A251 – palivo dřevní pelety

Měření druhého druhu paliva proběhlo na stejném kotli, tudíž nebylo nutné měnit měřicí trať. Tentokrát se měřilo při maximálním výkonu kotle a tomu odpovídalo nastavení vzduchového ventilátoru tak, aby dodával požadované množství spalovacího vzduchu.

Druhým palivem byly dřevní pelety, které měly vlhkost podobnou jako kávové pelety, 8,3 %. Vlhkost pelet, které jsou vyrobeny z kvalitního dřevního materiálu, by se měla pohybovat v rozmezí 7 až 10 %, Měřila se pouze jedna série měření.



Obr. 7.3: Spalované dřevní pelety

7.4.1 Měření 5 – Dřevní pelety

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	19
Celková doba měření	127 min

Tab 7.16: Nastavení parametrů 5. měření

Stejně jako při měření s kávovými peletami se měřily parametry kotle.

Měření 5		
P_{\min}	24,58	kW
P_{\max}	25,60	kW
$P_{\text{stř}}$	24,99	kW
T_{spmin}	284,31	°C
T_{spmax}	297,12	°C
$T_{\text{spstř}}$	290,4	°C

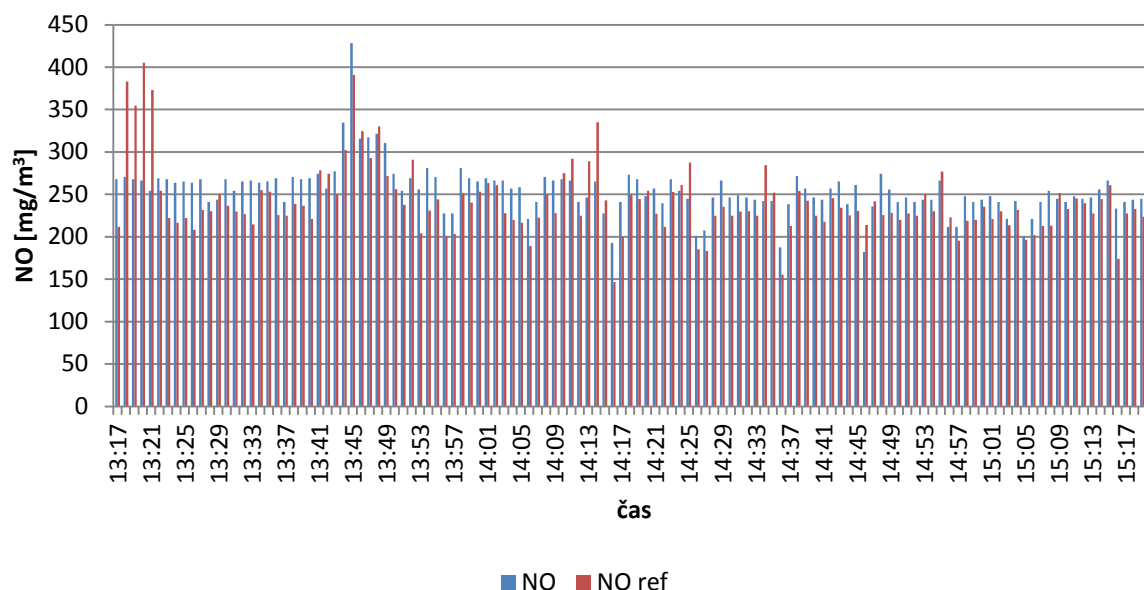
Tab. 7.17: Parametry kotle v průběhu 5. měření

A dále se měřily koncentrace plyných škodlivin a obsahu kyslíku ve spalínách. Jelikož se jedná o spalování na jmenovitém výkonu, byly naměřeny pouze emise CO a NO. Střední hodnota obsahu kyslíku ve spalínách je 12,21 %.

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
13:17	10,6	13:48	13	14:19	12	14:50	12
13:18	15,2	13:49	11,6	14:20	13	14:51	12,1
13:19	14,8	13:50	12,2	14:21	11,7	14:52	12,2
13:20	15,6	13:51	12,2	14:22	11,7	14:53	13
13:21	15,4	13:52	13,4	14:23	12,3	14:54	12,3
13:22	12,3	13:53	10,7	14:24	13	14:55	13,1
13:23	11,1	13:54	11	14:25	14	14:56	13,2
13:24	11	13:55	11,9	14:26	12,1	14:57	12,1
13:25	11,2	13:56	11,7	14:27	11,7	14:58	11,7
13:26	10,6	13:57	11,8	14:28	12	14:59	12
13:27	11,5	13:58	11,8	14:29	11,7	15:00	12,5
13:28	12,4	13:59	11,8	14:30	12	15:01	11,8
13:29	13	14:00	12,4	14:31	12,1	15:02	12,4
13:30	11,7	14:01	12,6	14:32	12,2	15:03	12,5
13:31	11,9	14:02	12,6	14:33	12,1	15:04	12,4
13:32	11,4	14:03	11,4	14:34	14	15:05	12,6
13:33	10,8	14:04	11,4	14:35	13,1	15:06	12
13:34	12,5	14:05	11,2	14:36	11,1	15:07	11,7
13:35	12,4	14:06	11,4	14:37	11,8	15:08	11,2
13:36	11,2	14:07	12,1	14:38	12,2	15:09	13
13:37	12,2	14:08	12,1	14:39	12,3	15:10	12,5
13:38	11,7	14:09	11,4	14:40	12	15:11	12,7
13:39	11,7	14:10	13	14:41	11,8	15:12	12,6
13:40	11	14:11	13,5	14:42	12,4	15:13	12,1
13:41	12,9	14:12	12,2	14:43	11,7	15:14	12,4
13:42	13,3	14:13	14	14:44	12,3	15:15	12,6
13:43	11,9	14:14	14,5	14:45	11,7	15:16	10
13:44	11,9	14:15	13,3	14:46	14	15:17	12,3
13:45	12	14:16	10,2	14:47	13	15:18	12,4
13:46	13	14:17	11,1	14:48	11	15:19	12
13:47	12,1	14:18	12	14:49	11,8	15:20	12
Střední hodnota obsahu O ₂							12,21 %

Tab. 7.18: Dřevní pelety měření 5 - Procentuální obsah kyslíku ve spalínách

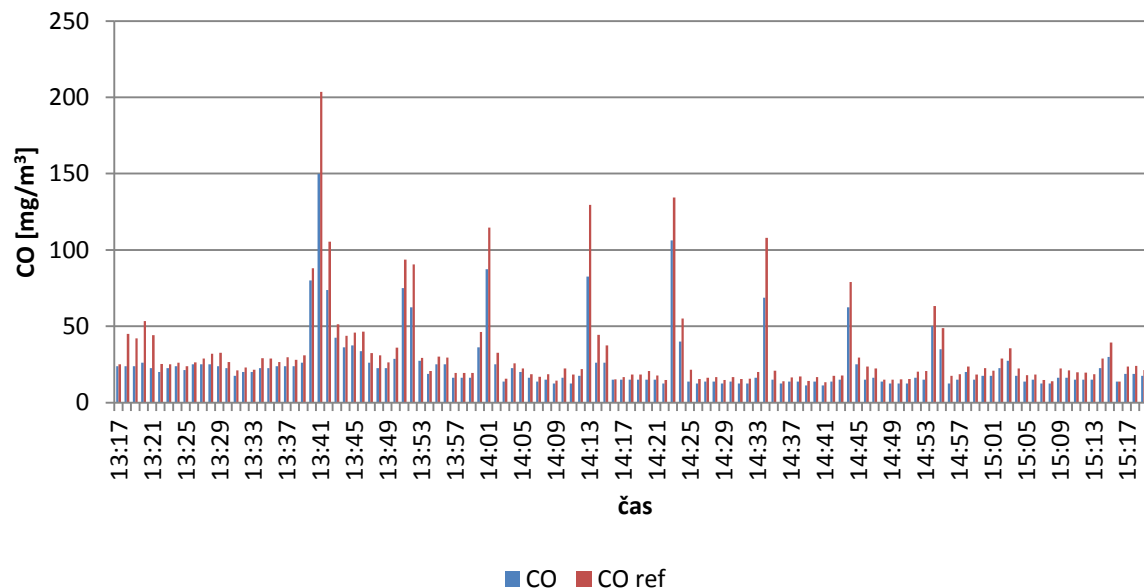
Naměřené hodnoty plyných škodlivin byly poměrně nízké, z toho lze vyvodit, že spalování probíhalo za poměrně optimálních podmínek.



Graf 7.20: Dřevní pelety měření 5 -- Koncentrace NO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty NO pro 5. měření.

- $\text{NO}_{\text{ref min}} = 146,67 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref stř}} = 241,79 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{NO}_{\text{ref max}} = 405,37 \text{ mg/m}^3$**



Graf 7.21: Dřevní pelety měření 5 - Koncentrace CO v průběhu spalování

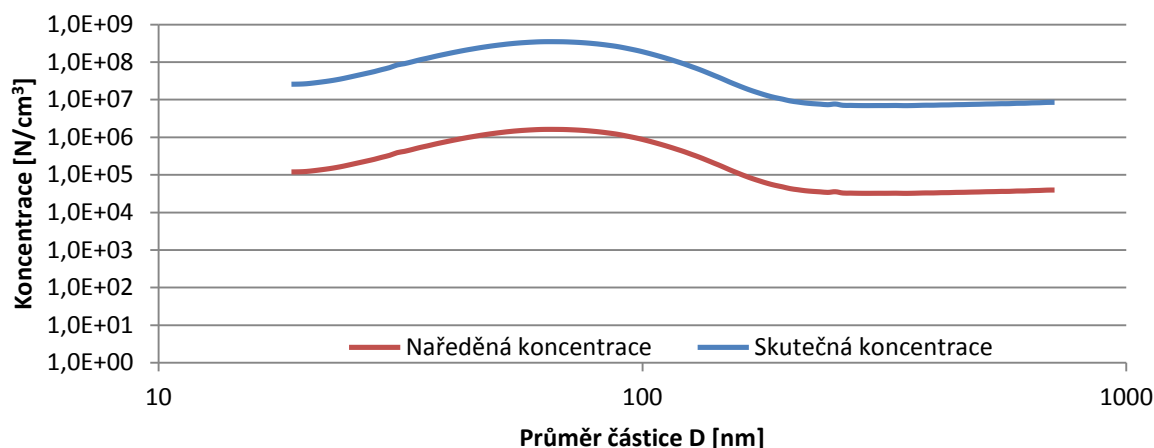
Přepočítané referenční hodnoty CO pro 5. měření.

- $\text{CO}_{\text{ref min}} = 13,45 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}_{\text{ref stř}} = 32,18 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{CO}_{\text{ref max}} = 203,65 \text{ mg/m}^3$**

Vlastní měření jemných částic ve spalínách, pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 12,21 %, které odpovídá průměrný výkon kotle 24,99 kW (přibližně 100 % výkon kotle), bylo realizováno devatenáct kompletních měření početní koncentrace jemných částic v závislosti na průměru částic. Měřeno bylo v rozsahu 18,8 až 710 nm.

Po exportu do MS Excel a po odečtení pozadí a vynásobení hodnot ředicím poměrem (nezměnil se, 213,75) vyšla skutečná koncentrace jemných částic ve spalínách.

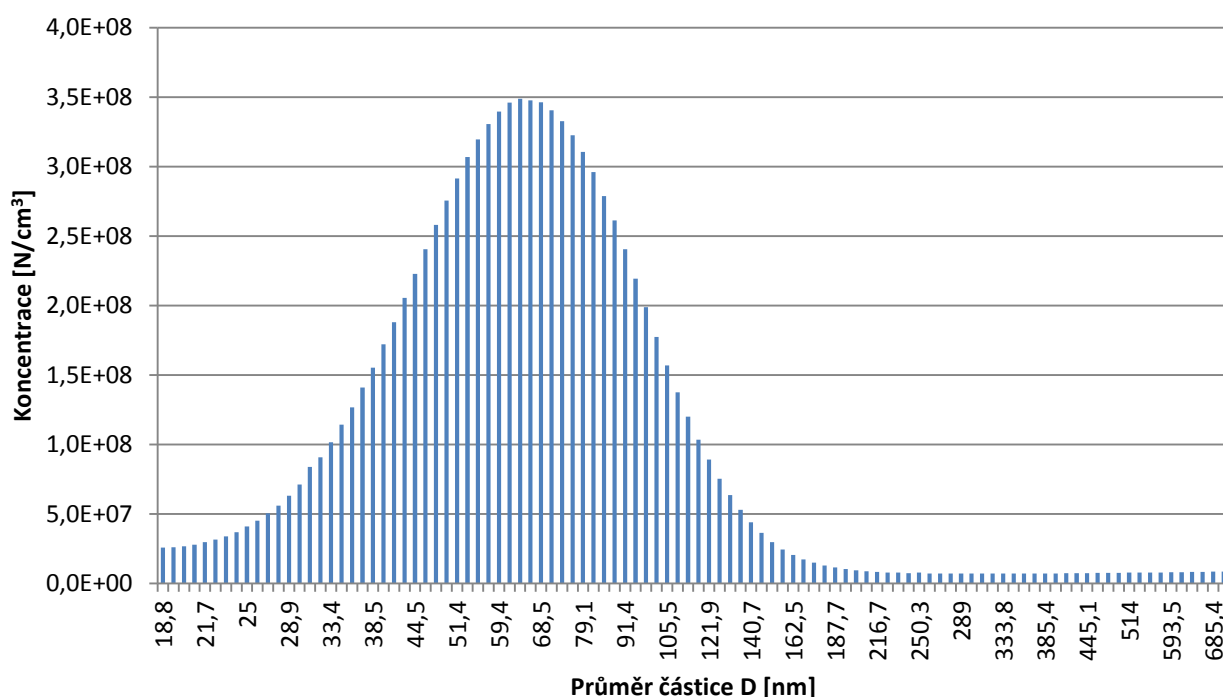
Výsledkem je grafické znázornění:



Graf 7.22: Dřevní pelety měření 5 - Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota obsahu O_2 ve spalínách 12,21 %

D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace
[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]
18.8	25749435.6	47.8	257844979.2	121.9	88960612.7	310.6	6976239.7
19.5	25950510.2	49.6	275411489.9	126.3	75335185.8	322.0	6976740.6
20.2	26536415.4	51.4	291340643.7	131.0	63597622.8	333.8	7016302.7
20.9	27795221.3	53.3	306778497.2	135.8	52823999.6	346.0	6941645.6
21.7	29511994.2	55.2	319488538.6	140.7	43828575.4	358.7	6965887.5
22.5	31426674.2	57.3	330519359.3	145.9	36207063.3	371.8	7052391.2
23.3	33864556.3	59.4	339572650.1	151.2	29556920.2	385.4	7124643.3
24.1	36795580.1	61.5	345957657.0	156.8	24407810.8	399.5	7127848.0
25.0	40796830.5	63.8	348664111.9	162.5	20361049.5	414.2	7232302.6
25.9	45116734.0	66.1	347671738.6	168.5	17199725.1	429.4	7257193.4
26.9	50256293.9	68.5	346150104.9	174.7	14779818.0	445.1	7368339.1
27.9	55907939.4	71.0	340373010.6	181.1	12826695.1	461.4	7397891.8
28.9	63060937.1	73.7	332636307.0	187.7	11381330.1	478.3	7503733.1
30.0	71090188.0	76.4	322474057.4	194.6	10341751.2	495.8	7555323.8
31.1	83705792.0	79.1	310473500.6	201.7	9287101.9	514.0	7671794.9
32.2	90705763.8	82.0	296059395.0	209.1	8688578.2	532.8	7725271.9
33.4	101566656.1	85.1	278594083.1	216.7	8169694.0	552.3	7822173.0
34.6	114282386.6	88.2	261278712.8	224.7	7836520.2	572.5	7830376.9
35.9	126563526.5	91.4	240510109.7	232.9	7615169.3	593.5	8010444.7
37.2	141015002.1	94.7	219346687.2	241.4	7357011.3	615.3	8031764.4
38.5	155217693.4	98.2	198756214.7	250.3	7655726.0	637.8	8198094.2
40.0	172075638.0	101.8	177214656.3	259.5	7076881.7	661.2	8284043.8
41.4	187961087.6	105.5	156816303.6	269.0	7042140.8	685.4	8465600.3
42.9	205385883.5	109.4	137479617.2	278.8	6979142.6	710.5	8498408.8
44.5	222793697.2	113.4	119974624.9	289.0	6957922.9		
46.1	240382163.8	117.6	103398072.1	299.6	6963355.4		

Tab. 7.20: Dřevní pelety měření 5 - Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.23: Dřevní pelety měření 5 - Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 12,21 %

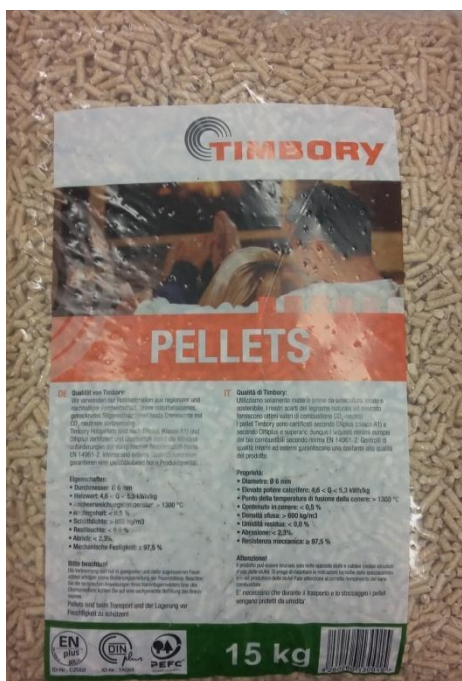
Z grafu můžeme vyčíst, že při spalování dřevních pelet, pro střední hodnotu kyslíku ve spalínách 12,21 % je maximální koncentrace částice o průměru 63,8 nm. Maximální koncentrace částic je $3,48E+8 \text{ N/cm}^3$, což můžeme přepočítat na $3,48E+14 \text{ N/m}^3$.

Toto měření bylo poslední na kotli VERNER A251, dále se bude měřit koncentrace jemných částic na jiném kotli.

7.5 Kotel Ekoscroll V7 Economic – dřevní pelety

Kotel Ekoscroll byl na kotelně sestavený a plně funkční, jelikož tento kotel má odvod spalín jinde než kotel VERNER, bylo obtížnější upevnit sondu ředícího zařízení, protože se upevňovala do velké výšky. Tento kotel je primárně určen pro spalování uhlí, ale je snaha získat pro něj certifikaci i pro spalování dřevních pelet.

Právě dřevní pelety byly použité jako palivo při tomto měření. Vlhkost pelet byla kolem 8,5 %. Provedla se jedna série měření.



Obr. 7.4: Spalované dřevní pelety

7.5.1 Měření 6 – Dřevní pelety Ekoscroll

CPC model	3775 low
Aerosol	0,3 l/min
Sheatflow	3 l/min
Měřicí rozsah	18,8 – 710 nm
Délka měření	4 min
Počet měření	5
Celková doba měření	26 min

Tab 7.21: Nastavení parametrů 5. měření

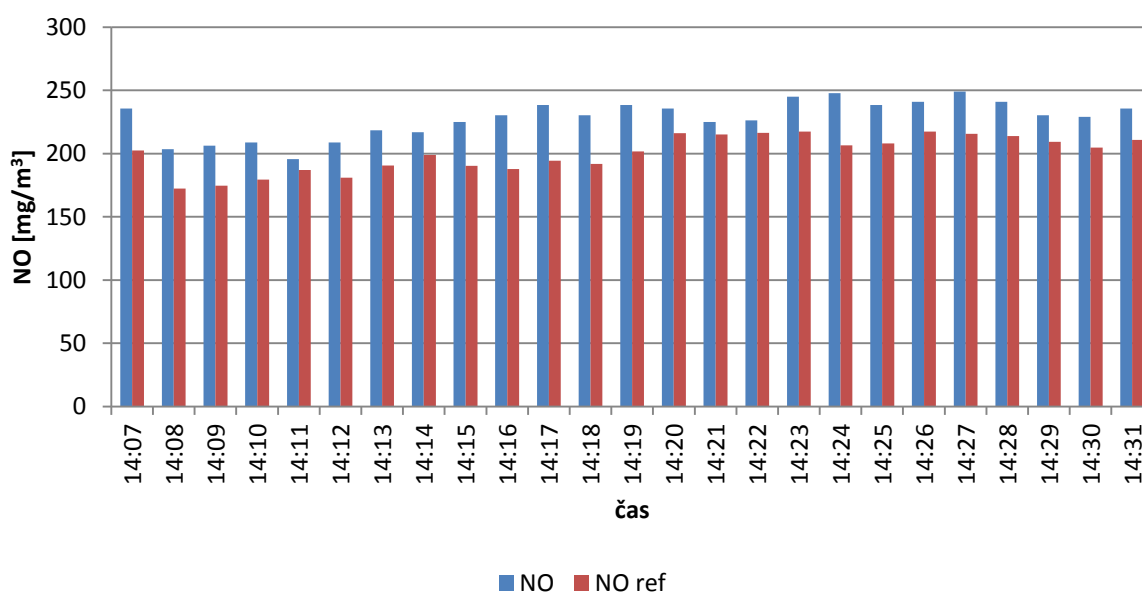
Měření 6		
P_{\min}	24,62	kW
P_{\max}	25,51	kW
$P_{\text{stř}}$	24,98	kW
T_{spmin}	260,24	°C
T_{spmax}	286,34	°C
$T_{\text{spstř}}$	274,15	°C

Tab. 7.22. Parametry kotle v průběhu 6. měření

Nedílnou součástí opět bylo měření plyných škodlivin. Naměřeny byly hodnoty emisí NO a CO a obsah kyslíku ve spalínách, jehož střední hodnota v průběhu měření byla 8,44 %.

čas měření [h:min]	O ₂ [%]	čas měření [h:min]	O ₂ [%]
14:07	8,2	14:20	9
14:08	8	14:21	9,5
14:09	8	14:22	9,5
14:10	8,2	14:23	8,6
14:11	9,5	14:24	7,8
14:12	8,3	14:25	8,4
14:13	8,4	14:26	8,8
14:14	9	14:27	8,3
14:15	8	14:28	8,6
14:16	7,5	14:29	8,9
14:17	7,5	14:30	8,7
14:18	7,8	14:31	8,7
14:19	8		
Střední hodnota obsahu O ₂			8,44 %

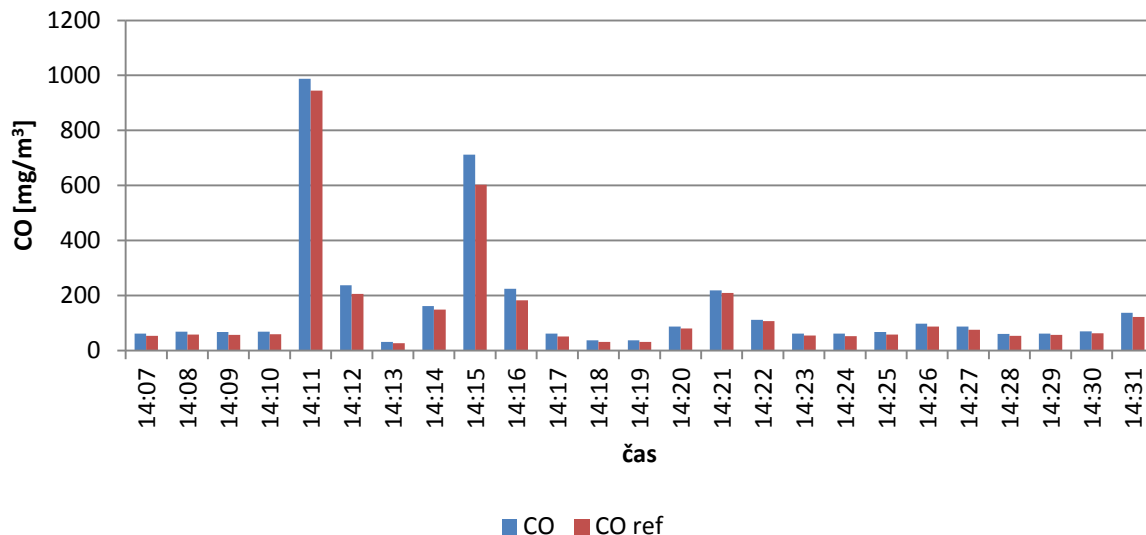
Tab. 7.23: Dřevní pelety měření 6 – Procentuální obsah kyslíku ve spalínách



Graf 7.24: Dřevní pelety měření 6 – Koncentrace NO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty NO pro 6. měření.

- $\text{NO}_{\text{ref min}} = 172,20 \text{ mg/m}^3$
- $\text{NO}_{\text{ref stř}} = 200,11 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{NO}_{\text{ref max}} = 217,35 \text{ mg/m}^3$**



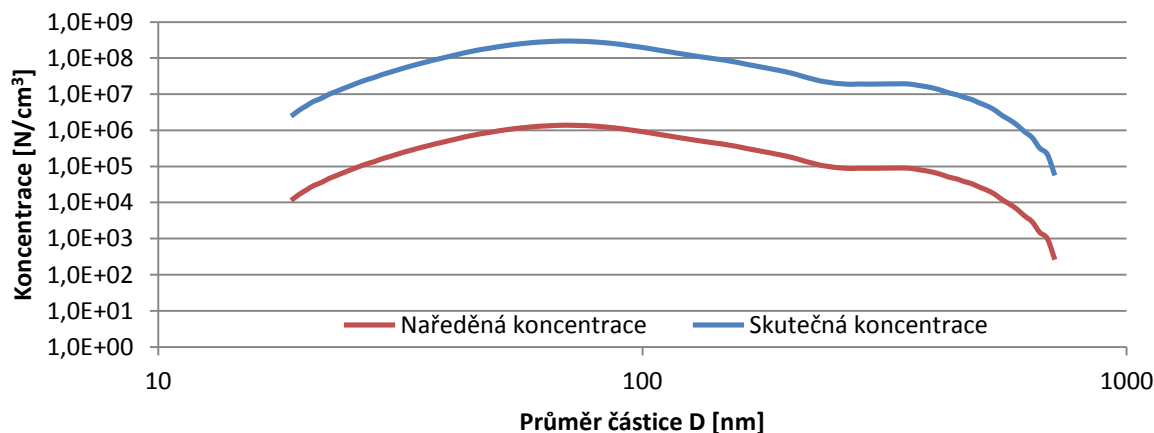
Graf 7.25: Dřevní pelety měření 6 – Koncentrace CO v průběhu spalování

Přepočítané referenční hodnoty CO pro 6. měření.

- $\text{CO}_{\text{ref min}} = 27,27 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}_{\text{ref stř}} = 139,11 \text{ mg/m}^3$
- **$\text{CO}_{\text{ref max}} = 944,41 \text{ mg/m}^3$**

Jemné částice byly měřeny pro střední hodnotu obsahu kyslíku ve spalínách 8,44 %, a kotel spaloval na maximálním výkonu s průměrnou hodnotou 24,98 kW. Bylo provedeno 5 kompletních měření koncentrace jemných částic. Částice byly měřeny v rozsahu 18,8 až 710 nm. Výsledky měření se upravily v MS Excel.

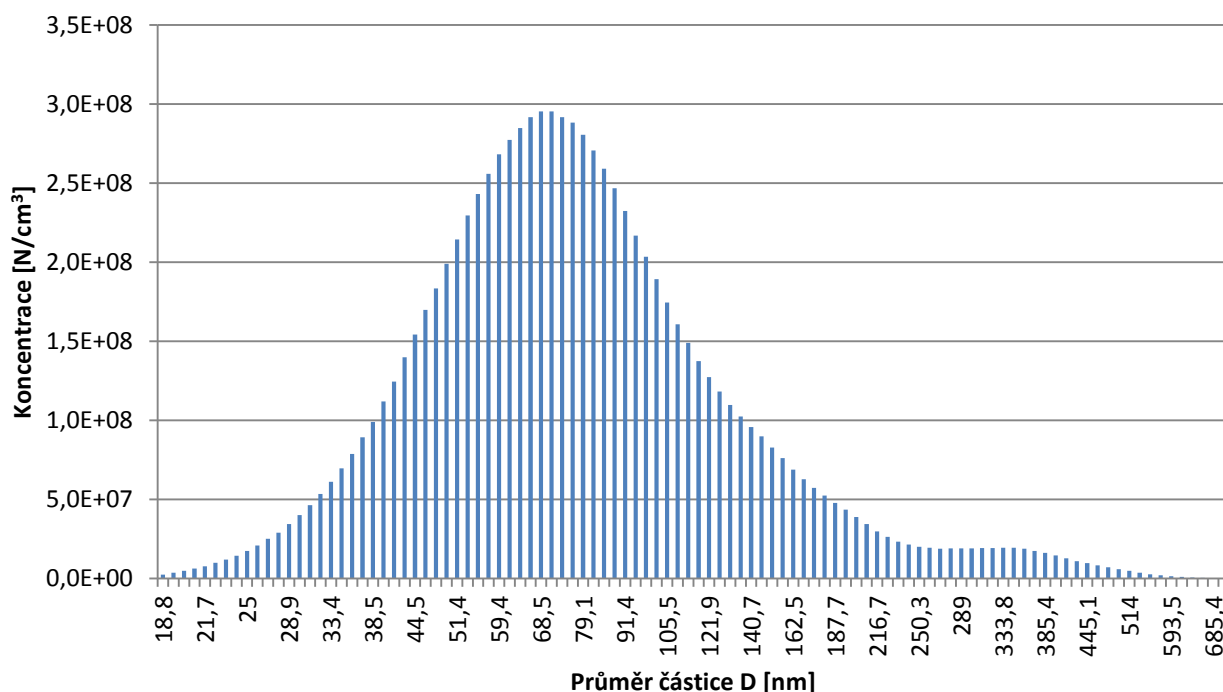
Výsledná tabulka a grafické znázornění:



Graf 7.26: Dřevní pelety měření 6 – Porovnání naředěné a skutečné koncentrace, střední hodnota O_2 ve spalínách 8,44 %

D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace	D	Koncentrace
[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]	[nm]	[N/cm ³]
18.8	2435240.9	47.8	183243761.1	121.9	127267764.9	310.6	19115493.7
19.5	3546359.3	49.6	198918916.8	126.3	118075597.4	322.0	19204649.1
20.2	4724727.1	51.4	214229846.6	131.0	109671876.4	333.8	19290610.9
20.9	6256877.4	53.3	229431129.6	135.8	102382370.0	346.0	19391920.2
21.7	7662426.4	55.2	243054856.3	140.7	95655348.0	358.7	18840302.5
22.5	9887080.7	57.3	255811330.9	145.9	89728371.8	371.8	17393262.1
23.3	11888837.6	59.4	268129432.7	151.2	82694856.5	385.4	16128013.6
24.1	14309856.5	61.5	277339649.1	156.8	76035991.4	399.5	14615844.2
25.0	17331329.0	63.8	284826587.6	162.5	68853183.6	414.2	12755805.1
25.9	20820071.2	66.1	291620526.6	168.5	62757368.8	429.4	10806483.0
26.9	25045480.4	68.5	295290171.3	174.7	57215367.6	445.1	9670853.0
27.9	28973607.9	71.0	295306478.4	181.1	52432986.9	461.4	8183477.0
28.9	34366788.3	73.7	291511968.4	187.7	47673314.4	478.3	7130231.1
30.0	39947701.7	76.4	288082747.3	194.6	43386449.2	495.8	5749885.8
31.1	46274677.3	79.1	280464857.0	201.7	38892497.2	514.0	4732172.5
32.2	53392241.9	82.0	270510457.3	209.1	34325161.4	532.8	3695219.5
33.4	61030234.2	85.1	259080451.0	216.7	29701132.5	552.3	2589894.5
34.6	69666677.6	88.2	246719174.8	224.7	26239597.2	572.5	1954487.9
35.9	78737802.9	91.4	232410612.5	232.9	23182164.8	593.5	1397366.6
37.2	89303063.1	94.7	216692001.8	241.4	21492565.4	615.3	909033.6
38.5	98936945.5	98.2	203272898.2	250.3	19994802.6	637.8	629120.1
40.0	111970831.3	101.8	189219770.6	259.5	19315744.0	661.2	318809.1
41.4	124491847.9	105.5	174451189.6	269.0	18731075.0	685.4	216170.1
42.9	139813123.4	109.4	160754311.3	278.8	19081507.7	710.5	56117.8
44.5	154220787.8	113.4	148948418.3	289.0	19013813.3		
46.1	169812603.6	117.6	137308565.5	299.6	18997547.6		

Tab. 7.24: Dřevní pelety měření 6 – Skutečné koncentrace jemných částic ve spalínách



Graf 7.27: Dřevní pelety měření 6 - Skutečná koncentrace jemných částic, střední hodnota obsahu O₂ ve spalínách 8,44 %

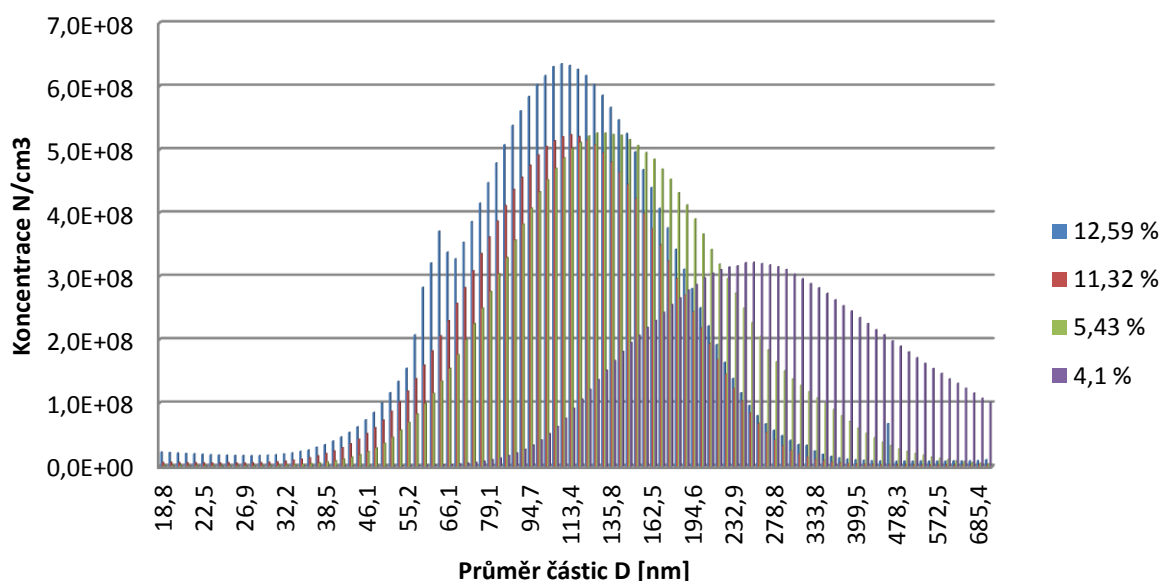
Z grafu a z tabulky můžeme vyčíst, že při spalování dřevěných pelet, pro střední hodnotu kyslíku ve spalínách 8,44 % je maximální koncentrace částice o průměru 71 nm. Maximální koncentrace částic je $2,95\text{E}+8 \text{ N/cm}^3$, což můžeme přepočítat na $2,95\text{E}+14 \text{ N/m}^3$.

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po dokončení měření jsou k dispozici všechna naměřená data, a je možné vyhodnotit výsledky měření koncentrace jemných částic ve spalínách a porovnat různá měření, z čehož lze vyvodit závěry.

8.1 Čtyři různá množství spalovacího vzduchu při spalování kávy

Při prvním porovnávání vyhodnotíme vliv množství spalovacího vzduchu (výkonu kotle) na množství jemných částic produkovaných při spalování kávových pelet. Množství spalovacího vzduchu představuje obsah kyslíku ve spalínách.



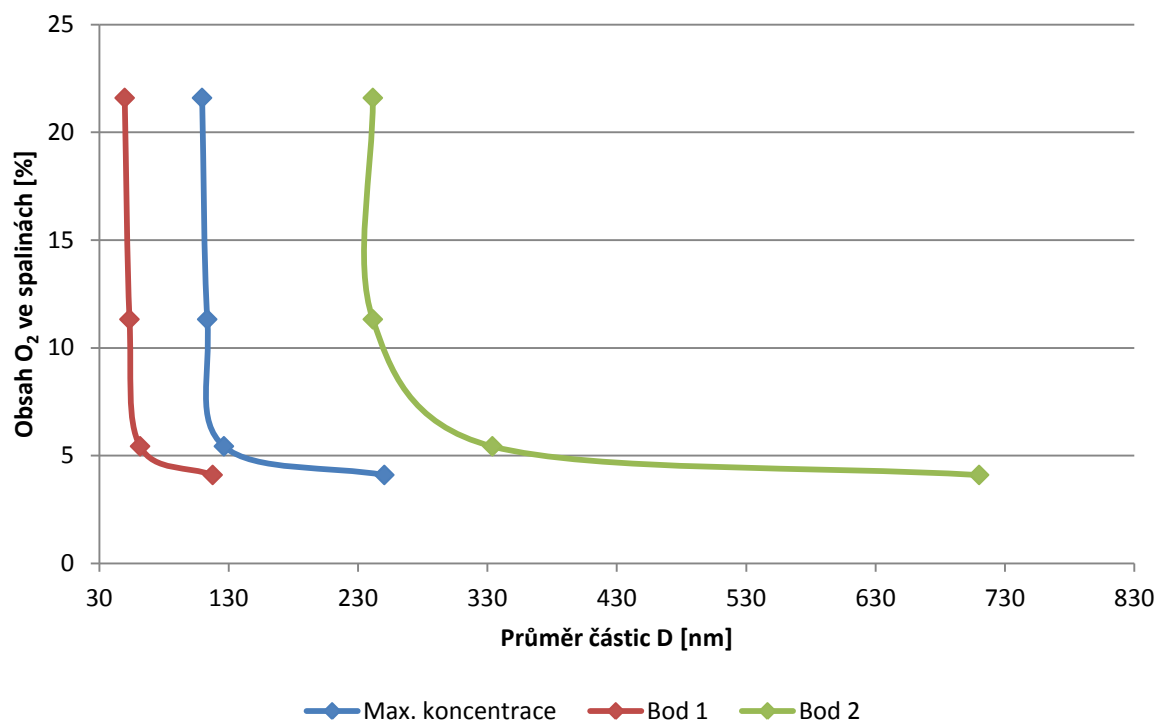
Graf 8.1: Porovnání koncentrace jemných částic pro 4 různá množství spalovacího vzduchu při spalování kávových pelet

Z grafu je vidět, určitý trend. Platí, že se zmenšujícím se přebytkem vzduchu ve spalínách se hodnota maximální koncentrace posouvá směrem k větším průměrům částic.

Dále je možné stanovit, při kterém průměru částice se koncentrace částic dostane nad určitou vhodně zvolenou hodnotu (Bod 1), a naopak při kterém průměru částic se koncentrace znovu dostane pod tuto hodnotu (Bod 2). Tuto hodnotu volíme $1,00\text{E}+8 \text{ N/cm}^3$. Při této hodnotě už začíná koncentrace částic výrazně růst.

Obsah O_2	max_D	Bod 1	Bod 2
[%]	[nm]	[nm]	[nm]
21,59	109,4	49,6	241,4
11,32	113,4	53,3	241,4
5,43	126,3	61,5	333,8
4,10	250,3	117,6	710,5

Tab. 8.1: Významné hodnoty při spalování kávových pelet na kotli VERNER A 251

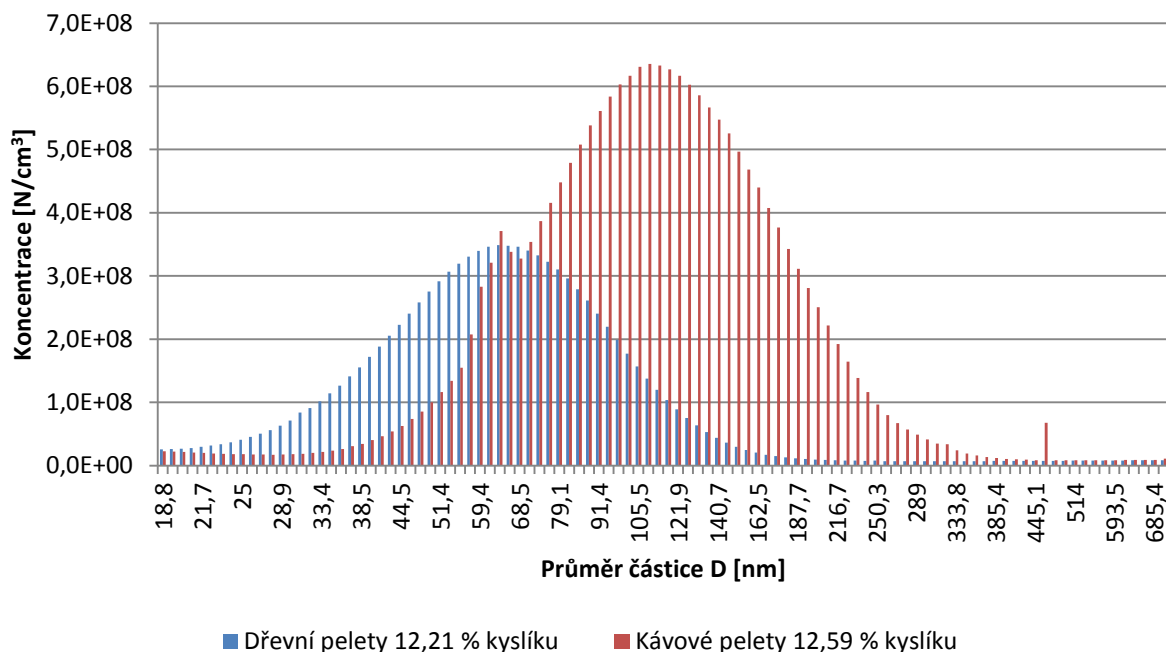


Graf 8.2: Závislost významných hodnot na obsahu kyslíku ve spalínách

Výsledné závislosti tvoří hranice, ve kterých by se měly pohybovat koncentrace jemných částic vyšší než $1,0E+8 \text{ N/cm}^3$ a maximální koncentrace pro všechna měření prováděná na stejném kotli při použití stejného paliva. Pro získání přesnější závislosti by bylo potřeba provést měření pro více různých množství spalovacího vzduchu (nebo obsahu kyslíku ve spalínách).

8.2 Porovnání spalování kávových a dřevních pelet na stejném kotli

Druhé srovnání je zaměřeno na porovnání měření pro dvě různá paliva na kotli VERNER A251. Prvním palivem jsou kávové pelety a druhým palivem jsou dřevní pelety. Množství přebytku vzduchu ve spalínách je u obou měření podobné, 12,59 a 12,21 %.



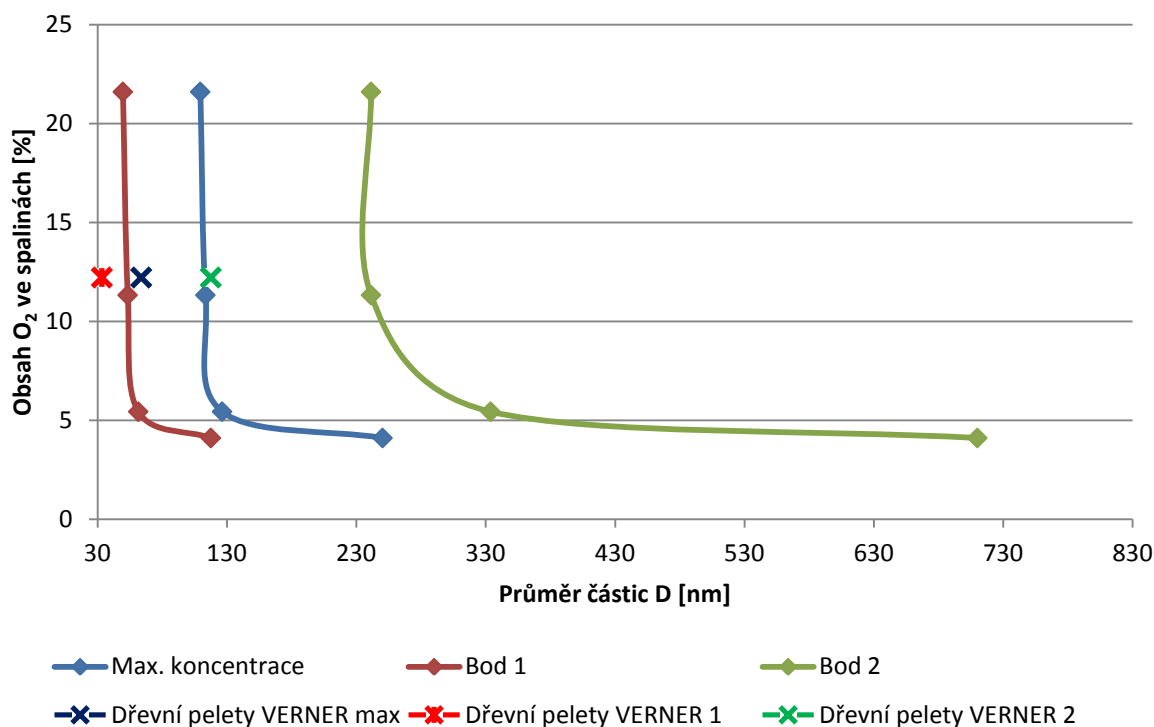
Graf 8.3: Porovnání koncentrace jemných částic při spalování dřevních a kávových pelet na kotli VERNER A251

Po porovnání dřevních a kávových pelet můžeme říct, že při spalování kávových pelet vzniká větší množství jemných částic a maximální koncentrace je u částic s větším průměrem.

Pokud porovnáme hodnoty průměrů částic pro maximální koncentraci a průměry částic, kdy koncentrace překračuje hranici $1,00E+8 \text{ N/cm}^3$, při spalování dřevních pelet, a trend vývoje hodnot při spalování kávových pelet, je vidět, že pro různá paliva se nelze řídit stejným trendem vývoje.

Obsah O ₂	max _D	Bod 1	Bod 2
[%]	[nm]	[nm]	[nm]
12,21	63,8	33,4	117,6

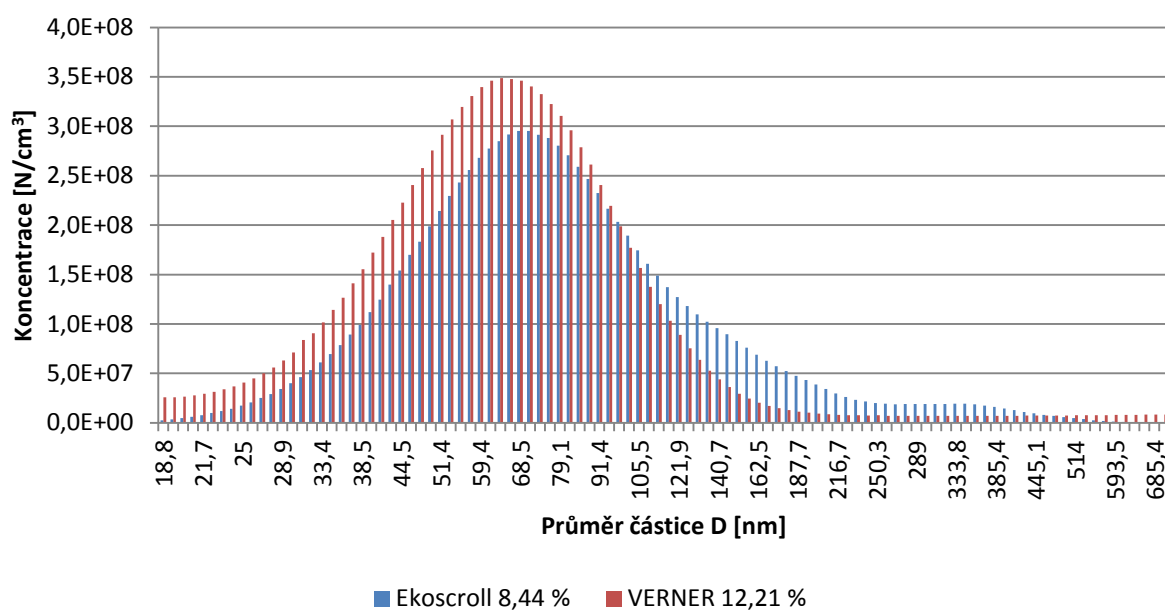
Tab. 8.2: Významné hodnoty při spalování dřevních pelet na kotli VERNER A251



Graf 8.4: Porovnání významných hodnot při spalování kávových a dřevních pelet

8.3 Porovnání spalování dřevěných pelet na dvou kotlích

Třetí srovnání je zaměřeno na porovnání měření na dvou různých automatických kotlích. První měření je na kotli VERNER A251 a druhé na kotli Ekoscroll V7 Ekonomice. V obou případech byly jako palivo použity dřevní pelety, ale byly naměřeny rozdílné hodnoty přebytku kyslíku ve spalínách.

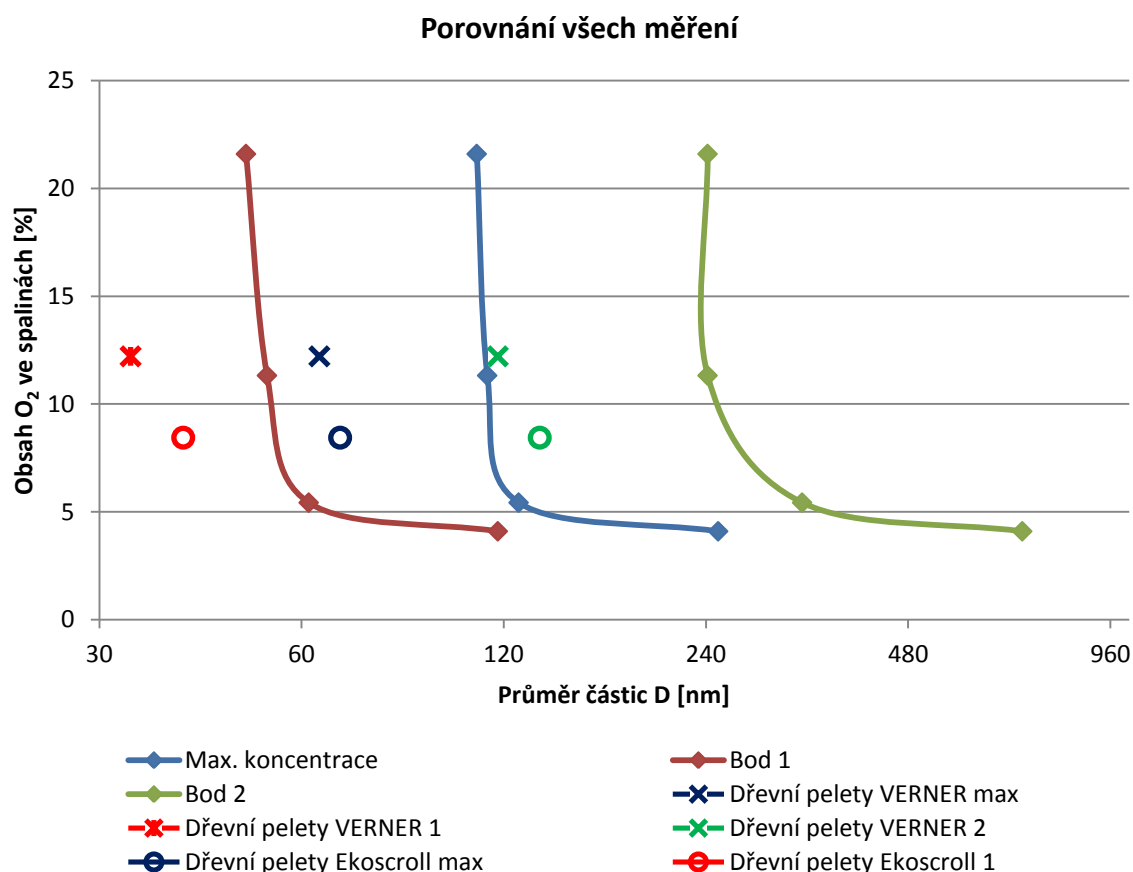


Graf 8.5: Porovnání koncentrace jemných částic při spalování dřevních pelet na kotlích VERNER A251 a Ekoscroll V7

Pokud porovnáváme dva různé kotle, ale spalujeme stejný typ paliva, nejsou výsledné koncentrace tak rozdílné, rozdíly jsou tvořeny rozdílným obsahem kyslíku ve spalínách. Znovu se ukazuje, že při klesajícím přebytku vzduchu, se průměr částic, při nichž je naměřena maximální koncentrace, zvětšuje.

Obsah O ₂	max _D	Bod 1	Bod 2
[%]	[nm]	[nm]	[nm]
8,44	68,5	40	135,8

Tab. 8.3: Významné hodnoty při spalování dřevních pelet na kotli Ekoscroll V7
Economic



Graf 8.6: Porovnání významných hodnot pro všechna měření

Co se týče trendů závislosti průměru částic pro maximální naměřenou koncentraci na obsahu kyslíku ve spalínách, což vidíme v grafu 8.6, pokud porovnáme všechna měření dohromady, je patrné, že obě měření při spalování dřevních pelet se vymykají trendu při spalování kávových pelet, ale vypadá to, že spalování dřevních pelet by mohlo mít svůj vlastní trend vývoje.

Z toho by se dal vyvodit závěr, že průměry částic, které mají největší koncentraci, nezávisí ani tak na typu kotle, ale hlavně na množství spalovacího vzduchu a typu spalovaného paliva.

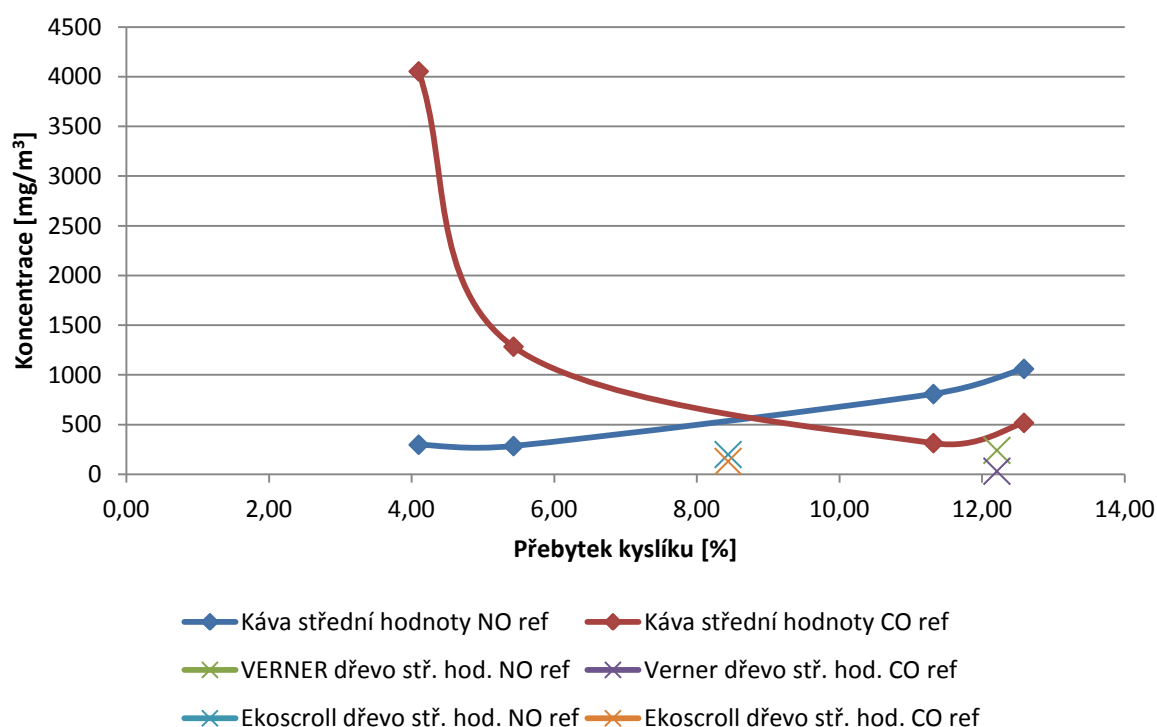
8.4 Vývoj koncentrace plyných škodlivin

Pokud se podíváme na vývoj hodnoty koncentrace plyných škodlivin, je vidět, že se snižujícím se přebytkem vzduchu ve spalínách se snižuje koncentrace NO, což je způsobeno nižší teplotou spalování. Koncentrace CO naopak roste, příčinou je nedokonalé spalování.

Pokud porovnáme dřevní a kávové pelety, tak nižší emise plyných škodlivin se naměřily při spalování dřevních pelet.

O ₂	NO _{ref stř}	CO _{ref stř}
[%]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
12,59	1061,13	518,32
11,32	808,41	315,00
5,43	284,89	1284,76
4,10	298,23	4053,74
12,21	241,79	32,18
8,44	200,11	131,11

Tab. 8.4: Střžení hodnoty koncentrace NO_{ref} a CO_{ref}



Graf 8.7: Závislost střední hodnoty koncentrace NO_{ref} a CO_{ref} na přebytku O₂ ve spalínách

9 ZÁVĚR

Rešeršní část práce popisuje problematiku spalovacího procesu se zaměřením na plynné produkty spalování. Stručně popisuje členy, které do spalovacího procesu vstupují (palivo a spalovací vzduch), a je soustředěna na členy, které spalovací proces opouští (teplo, popel a spaliny), zejména pak na spaliny. Spaliny opouštějící spalovací proces obsahují různé plynné znečišťující látky. Některé tyto látky mají vliv na životní prostředí, způsobují kyselý dešť (SO_2 , SO_3 , NO_x), a podílí se na globálním oteplování (CO_2 , C_xH_y). A některé nejvíce toxické látky mají velmi negativní vliv na lidský organismus (dioxiny, furany, PAU) a jsou příčinou celé řady zdravotních problémů. Vznik plynných škodlivin je ovlivněn volbou paliva a podmínkami při spalování.

Kromě plynných škodlivin odchází ve spalínách do ovzduší také jemné částice TZL, mezi tyto částice řadíme popílek, což je nehořlavá složka paliva, která odchází ze spalovacího procesu, dále saze, které vznikají při nedokonalém spalování v plameni a jsou tvořeny hořlavou složkou paliva a organické částice, jejichž základem jsou uhlovodíky. Škodlivost TZL je způsobena jednak samotnými jemnými částicemi, které mohou proniknout do živých organismů. A další nebezpečí spočívá v tom, že tyto jemné částice se navážou nějaké toxické látky. V obou případech platí, že čím jsou částice menší, tím jsou škodlivější, protože pronikají hlouběji do organismu.

Množství znečišťujících látek, ať už jde o plynné škodliviny nebo TZL, které vznikají při lidské činnosti, je nutné regulovat. K tomuto účelu slouží normy, které udávají emisní limity pro danou škodlivinu. Normy se mohou lišit podle toho, ve které zemi byly vydané. Hlavní sledovanou veličinou, která je součástí všech norem, je CO. S postupem času se jednotlivé emisní limity zpřísňují, a na to musí reagovat majitelé a výrobci spalovacích zařízení. Ti musí zajistit, aby tato zařízení splňovala příslušné emisní limity, pokud by tomu tak nebylo, zákon umožňuje tyto osoby sankcionovat.

Aby bylo možné porovnávat emise ze spalovacích zařízení s emisními limity, je nutné použití měřicích zařízení. Typ zařízení závisí na tom, kde bude měření probíhat. Měřicí zařízení mohou být jak přenosná, tak nepřenosná. Další rozdělení měřicích zařízení je podle toho jakou metodu měření využívají. Pro měření jemných částic se používá několik metod:

- gravimetrická metoda
- metoda SMPS
- optické prachoměry
- elektroodlučovače

Pro měření realizované v rámci této práce byl použitý systém měření SMPS, tento systém se skládá ze tří zařízení, která na sebe navazují:

- ředicí přístroj – Rotating Disc Thermodiluter 379020A
- třídící přístroj – Electrostatic Classifier 3080
- čítací přístroj – Condensation Particle Counter 3775

A pro vyhodnocení naměřených dat slouží vyhodnocovací program Aerosol Instrument Manager Software. Měřila se koncentrace jemných částic v odebíraných spalínách. Měření probíhalo na dvou automatických kotlích. Prvním byl automatický kotel VERNER A251, ve kterém se nejdříve spalovaly kávové pelety. Byly provedeny čtyři série měření, v každé sérii měření se spalovalo s jiným množstvím spalovacího

vzduchu, kterému odpovídal příslušný výkon kotle. Poté se spalovaly dřevní pelety, při tomto spalování se měřila jen jedna série, spalovalo se s množstvím spalovacího vzduchu, kterému odpovídal 100% výkon kotle. Druhým byl automatický kotel Ekoscroll V7 Economic. ve kterém se spalovaly dřevní pelety, provedla se jedna série měření a opět se spalovalo s množstvím spalovacího vzduchu a při 100% výkonu kotle. Výstupem z těchto měření byly tabulky hodnot a grafické znázornění závislosti koncentrace jemných částic na průměru měřené částice. Velikost měřených částic byla v rozsahu 18,8 až 710 nm, měřené částice spadají do kategorie PM₁. Současně s měřením koncentrace jemných částic se v průběhu všech měření měřila i koncentrace plyných škodlivin (NO, CO) a přebytek O₂ ve spalínách.

Po dokončení všech měření se výsledky musely vyhodnotit. Ukázalo se, že pokud se při spalování jednoho typu paliva snižuje množství spalovacího vzduchu a tím se snižuje i přebytek O₂ ve spalínách, je možné pozorovat jakýsi vývojový trend, s klesajícím přebytkem vzduchu se zvyšuje průměr částice, pro který byla naměřena maximální koncentrace. Celý graf se posouvá směrem doprava. Pokud se však tento trend porovná s jiným palivem, tyto hodnoty do tohoto trendu nezapadají a vytváří jiný trend. Pokud se porovnaly dřevní a kávové pelety, výsledkem bylo, že při spalování kávových pelet vniká větší množství jemných částic a maximální koncentrace je pro větší průměry měřených částic. Pro zpřesnění výsledků z měření by bylo nutné realizovat mnohem větší počet měření, pro větší množství hodnot spalovacího vzduchu a pro více typů paliv.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Studijní materiály z předmětu: Spalovací zařízení a výměníky tepla. Vyučující: doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..
- [2] Studijní materiály z předmětu: Zdroje a přeměna energie. Vyučující: doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..
- [3] Studijní materiály z předmětu: Vliv přeměn energie na životní prostředí. Vyučující: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
- [4] *Kotle - kotly: Kotly na biomasu* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.kotle-kotly.sk/kotle-na-biomasu/>
- [5] *Snizujeme: Výhody zemního plynu* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.snizujeme.cz/clanky/vyhody-zemniho-plynu/>
- [6] *Petroleum: Ropa* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/>
- [7] *Zdemar: Bílinské hnědé uhlí - OŘECH 1* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.palivazdemar.cz/ledvice-hnede-uhli-orech-1-volne>
- [8] SKÁLA, Zdeněk. *Ekologie v energetice*. Brno: PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0477-9.
- [9] Školní sešit Palivové hospodářství
- [10] DRASTICHOVÁ, Vendula. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic*. Ostrava, 2015. Disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc..
- [11] *Spalovací procesy: Spaliny* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/Spaliny.html>
- [12] *NGK: Spaliny a škodlivé látky* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/lambda-sondy/zakladni-vedomosti-o-emisich/spaliny-a-skodlive-latky/>
- [13] LACKNER, Maximilian, Franz WINTER a Avinash K. (Avinash Kumar) AGARWAL. *Handbook of combustion*. 2010. Weinheim: Wiley-VCH,, 5 sv. ISBN 978-3-527-32449-1.
- [14] *Integrovaný registr znečišťování: Seznam látek* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/20#seznam>
- [15] *Hluk a emise: Polétavý prach - neviditelná hrozba* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/poletavy-prach-%E2%80%93-neviditelná-hrozba/>

- [16] *Popílek: Využití elektrárenských popílků* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.sevi.wz.cz/PUPN/popilek.pdf>
- [17] *MB-eko: Kvalita ovzduší v Mladé Boleslavi* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.mb-eko.cz/hlavni/jak-zit-neskodit/kvalita-ovzdusi-v-mlade-boleslavi>
- [18] *Tzbinfo: Vytápíme tuhými palivy* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [19] *Český statistický úřad: Vyhledávání vytápění – graf6 (Domácnosti podle používaných paliv a energií na vytápění podle krajů)* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/domov?p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_struts_action=%2Fsearch%2Fsearch&_3_redirect=%2Fweb%2Fczso%2Fkatalog-produktu-vydavame&_3_keywords=vyt%C3%A1p%C4%9Bn%C3%AD&_3_groupId=0
- [20] *Český statistický úřad: Vyhledávání vytápění - graf5 (Domácnosti využívající na vytápění více paliv a jejich nejčastější kombinace)* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/domov?p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_struts_action=%2Fsearch%2Fsearch&_3_redirect=%2Fweb%2Fczso%2Fkatalog-produktu-vydavame&_3_keywords=vyt%C3%A1p%C4%9Bn%C3%AD&_3_groupId=0
- [21] *Tzb - info: Kotle, kamna, krby* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [22] BAŠTA, T. Metody měření emisí tuhých látek ve spalínách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [23] Návod automatický kotel VERNER A251, Vydal: VERNER a.s., Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251#tab4>
- [24] Návod k automatickému kotli Ekoscroll V7 Economic, Vydal: Ekogalva s.r.o., Dostupné z: <http://ekoscroll.cz/automaticky-kotel-ekonomic/technicka-data-a-rozmary-kotle-kotel-ekonomic/>
- [25] *TZB-info: Porovnání hořáků pro automatické kotle* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11812-porovnani-horaku-pro-automaticke-kotle>
- [26] *Technická data a rozměry: Řez kotle* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://ekoscroll.cz/automaticky-kotel-ekonomic/technicka-data-a-rozmary-kotle-kotel-ekonomic/>
- [27] Manuál k přístroji Rotating disc hermodiluter 379020A. Vydal: TSI. 2012.
- [28] Manuál k přístroji SMPS 3080. Vydal TSI. 2009.
- [29] Manuál k přístroji CPC 3775. Vydal TSI. 2007.

[30] Manuál k programu AIM Software. Vydal TSI. 2010.

[31] *Energetický Ústav: Spalování pelet z kávy* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:
<http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetického-inzenyrstvi/o46-spalovani-pelet-z-kavy>

11 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol, zkratka	Jednotka	Význam
Q_i^r	[MJ/kg, MJ/m ³]	Výhřevnost
W^r, A^r, h^r		Voda, popelovina, hořlavina v palivu
$Q_{C, H, S}$	[MJ]	Teplo uvolněné spálením 1 kg
OZE		Obnovitelné zdroje energie
TZL		Tuhé znečišťující látky
PAU/PAH		Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCDD		Polychlor dibenzo dioxin
PCDF		Polychlor dibenzo furan
PM_x		Velikost částic TZL, x udává velikost v μm
N	[1]	Počet částic
R_p	[-]	Ředicí poměr
$R_{p\min/\max}$	[-]	Maximální/minimální ředicí poměr přístroje
n	[-]	Počet dílků nastavených na řediče
P_{\min}	[kW]	Minimální výkon kotle během měření
P_{\max}	[kW]	Maximální výkon kotle během měření
$P_{\text{stř}}$	[kW]	Střední hodnota výkonu kotle během měření
T_{\min}	[°C]	Minimální teplota spalin během měření
T_{\max}	[°C]	Maximální teplota spalin během měření
$T_{\text{stř}}$	[°C]	Střední hodnota teploty spalin během měření
O ₂	[%]	Přebytek kyslíku ve spalínách
CO _{ppm}	[ppm]	Koncentrace CO ve spalínách
NO _{ppm}	[ppm]	Koncentrace NO ve spalínách
ppm		Počet částic na milion
M	[g/mol]	Molární hmotnost
V_M	[m ³ /kmol]	Molární objem plynu
CO _{ref} , NO _{ref}	[mg/m _n ³]	Hodnoty koncentrace přepočtené na referenční obsah kyslíku 10 %
D	[nm]	Průměr měřené částice
max _d	[nm]	Průměr částice pro maximální koncentraci
Bod 1, Bod 2	[nm]	Průměr částice, kdy rostoucí/klesající koncentrace překročí zvolenou hodnotu
Bod 2	[nm]	Průměr částice, kdy klesající koncentrace překročí zvolenou hodnotu